



TUGAS AKHIR - TF 141581

**OPTIMASI PRODUKSI *CRUDE OIL*, ENERGI,
DAN AIR LIMBAH PADA *STEAM FLOOD*
ENHANCED OIL RECOVERY MENGGUNAKAN
*GENETIC ALGORITHM***

SONY ANDRIYANTO
NRP. 2412100003

Dosen Pembimbing
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TF141581

**OPTIMIZATION OF CRUDE OIL PRODUCTION,
ENERGY, AND WATER RECYCLE AT STEAM
FLOOD ENHANCED OIL RECOVERY USING
GENETIC ALGORITHM**

SONY ANDRIYANTO
NRP. 2412100 003

Supervisor
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI PRODUKSI *CRUDE OIL*, ENERGI, DAN AIR LIMBAH PADA *STEAM FLOOD ENHANCED OIL RECOVERY* MENGGUNAKAN *GENETIC ALGORITHM*

TUGAS AKHIR

Oleh:

SONY ANDRIYANTO

NRP: 2412 100 003

Surabaya, 26 Juni 2016

Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing,



Totok Ruki Biyanto, Ph.D

NIPN: 19710702 199801 1 001



**Ketua Jurusan
Teknik Industri FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIPN: 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI PRODUKSI *CRUDE OIL*, ENERGI, DAN AIR LIMBAH PADA *STEAM FLOOD ENHANCED OIL RECOVERY* MENGGUNAKAN *GENETIC ALGORITHM*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

SONY ANDRIYANTO
NRP. 2412 100 003

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Totok Ruki Biyanto, PhD (Pembimbing)
2. Ir. Ya'umar, M.T. (Ketua Penguji)
3. Ir. Syamsul Arifin, MT. (Penguji 1)
4. Ir. Harsono Hadi, MT, Ph.D (Penguji 2)

SURABAYA
Juni, 2016

OPTIMASI PRODUKSI *CRUDE OIL*, ENERGI, DAN AIR LIMBAH PADA *STEAM FLOOD ENHANCED OIL RECOVERY* MENGGUNAKAN *GENETIC ALGORITHM*

Nama Mahasiswa : Sony Andriyanto
NRP : 2412 100 003
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Totok Ruki Biyanto, PhD

Abstrak

Heavy oil memiliki jumlah akumulasi yang banyak. Minyak jenis ini memiliki viskositas yang tinggi, sehingga sulit untuk diangkat ke permukaan. *Steam flood* adalah salah satu jenis *Enhanced Oil Recovery* yang mampu mengangkat *heavy oil*. *Steam flood* menggunakan 2 sumur, yaitu sumur injeksi dan sumur produksi. Sumur injeksi digunakan untuk menginjeksi uap. Uap kemudian akan melepas panas pada reservoir sehingga dapat menurunkan viskositas minyak. Minyak mentah kemudian akan terdorong dan terangkat ke *production well*. Namun *steam flood* membutuhkan energi yang besar untuk menghasilkan uap, dan jumlah air limbah berbahaya yang tinggi. Sehingga produksi *steam flood operation* perlu dioptimasi dengan meminimalkan kebutuhan energi dan air limbah.

Metode Beggs-Brill digunakan untuk memodelkan gradien tekanan aliran vertikal dua fasa pada *injection well* dan *production well*. Rata-rata error pemodelan metode Beggs-Brill terhadap hasil simulasi PIPESIM adalah 2.369%. Aliran uap pada reservoir dapat dimodelkan sebagai aliran fluida dalam media berporos dengan persamaan Darcy. Rata-rata error pemodelan dengan persamaan Darcy adalah 0.39%. Ketiga model ini dirangkai dan digunakan untuk menghitung profit dari *steam flood operation*.

Genetic algorithm dapat mengoptimalkan kondisi operasi *steam flood* hingga 219.6%. Pada studi kasus Hamaca Field, profit dapat dioptimasi dari 7904.89 USD/hari menjadi 17360.34 USD/hari. Penambahan sucker rod pump yang kemudian dioptimasi dengan genetic algorithm, mampu menurunkan kebutuhan laju aliran injeksi (3.66%), menurunkan biaya water treatment (7.8%), menurunkan tekanan injeksi (34%), dan meningkatkan net profit (18.69%).

Kata Kunci: *Beggs-Brill, Darcy, genetic algorithm, steam flood*

OPTIMIZATION OF CRUDE OIL PRODUCTION, ENERGY, AND WATER RECYCLE AT STEAM FLOOD ENHANCED OIL RECOVERY USING GENETIC ALGORITHM

Name : Sony Andriyanto
NRP : 2412 100 003
Department : Department of Engineering Physics
Supervisor : Totok Ruki Biyanto, PhD

Abstract

Heavy oil has a large amount accumulation. This oil type has a high viscosity, making it difficult to be lifted to the surface. Steam flood is one of Enhanced Oil Recovery which able to lift heavy oil. Steam flood needs 2 wells, injection well and production well. Injection well is used to inject steam. The steam then release the heat into reservoir so as reduce oil viscosity. Then crude oil will be pushed and lifted to a production well. Steam flood requires a large number of energy in order to produce steam, and produces a large ammount of hazardous waste water. Therefore oil production at steam flood operation needs to be optimized by minimize energy requirement and waste water.

Beggs-Brill method is used to model the pressure gradient of vertical two-phase flow in the injection well and production well. The mean error of Beggs-Brill method against PIPESIM simulation result is 2.369%. The steam flow in reservoir can be modelled as fluid flow in porous media with Darcy equation. The mean error of Darcy equation model a gainst COMSOL simulation result is 0.39%. These models are joined and used to calculate the profit of steam flood operation.

Genetic algorithm optimize the operating conditions of steam flood up to 219.6%. In the case study at Hamaca Field, profit can be optimized from 7904.89 USD/day to 17360.34 USD/day. Adding sucker rod pump then optimized with genetic algorithm, is able to reduce the requirement of injection flow rate (3.66%), lower the cost of water treatment (7.8%), lower the injection pressures (34%), and increases net profit (18.69%).

Keyword: Beggs-Brill, Darcy, genetic algorithm, steam flood

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan.....	v
Abstrak.....	ix
Kata Pengantar.....	xiii
Daftar Isi.....	xv
Daftar Gambar.....	xvii
Daftar Tabel.....	xix
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Lingkup Kerja.....	2
 BAB II DASAR TEORI.....	 5
2.1 <i>Enhanced Oil Recovery</i>	5
2.2 <i>Thermal Recovery</i>	6
2.3. Metode Beggs-Brill.....	9
2.4 <i>Dimensionless Number</i>	14
2.5. Permeabilitas.....	17
2.6. Pemodelan Transfer Panas pada <i>Injection</i> atau <i>Production</i> Well.....	18
2.7. Pemodelan Transfer Panas pada Reservoir.....	18
2.8. <i>Genetic Algorithm</i>	19
 BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	 25
3.1. Penentuan Input <i>Steam Flood Operation</i> , dan <i>Reservoir</i> <i>Formation Properties</i>	26
3.2. Penentuan Fungsi Objektif.....	26
3.3. Pemodelan <i>Pressure Drop</i> dengan Persamaan Beggs-Brill dan Darcy.....	27
3.4. Perhitungan <i>Sweep efficiency</i> , <i>Production Rate</i> , Energi, dan Biaya Pengolahan Air Limbah.....	28
3.5. Optimasi Model dengan GA.....	29

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1. Hasil Pemodelan Tekanan pada <i>Injection</i> dan <i>Production Well</i> dengan Metode Beggs-Brill.....	31
4.2. Hasil Pemodelan Tekanan pada Reservoir dengan Persamaan Darcy	33
4.3. Hasil Perhitungan <i>Sweep Efficiency</i> , <i>Production Rate</i> , Energi, dan Biaya Pengolahan Air Limbah.....	34
4.4. Analisis Sensitifitas	35
4.5. Optimasi Menggunakan <i>Genetic Algorithm</i>	37
4.6. Optimasi <i>Steam Flood Operation</i> dengan <i>Sucker Rod Pump</i> menggunakan <i>Genetic Algorithm</i>	40
4.7. Perbandingan Hasil	37
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	 45
5.1. Kesimpulan	45
5.2. Saran.....	45
 DAFTAR PUSTAKA.....	 47
 LAMPIRAN A Daftar Simbol	
LAMPIRAN B Penurunan Rumus Beggs-Brill	
LAMPIRAN C Contoh Perhitungan <i>Pressure Drop</i> menggunakan Beggs-Brill pada <i>Injection Well</i>	
LAMPIRAN D Contoh Perhitungan <i>Pressure Drop</i> menggunakan Darcy pada <i>Reservoir Formation</i>	
LAMPIRAN E Contoh Perhitungan <i>Heat Transfer</i> pada <i>Injection Well</i>	
LAMPIRAN F Contoh Perhitungan <i>Heat Transfer</i> pada Reservoir	
LAMPIRAN G Validasi Pemodelan Suhu dan Tekanan menggunakan Beggs-Brill pada <i>Injection Well</i>	
LAMPIRAN H Validasi Pemodelan Suhu dan Tekanan menggunakan Beggs-Brill pada <i>Production Well</i>	
LAMPIRAN I Validasi Pemodelan Tekanan pada Reservoir menggunakan Darcy	
LAMPIRAN J Validasi Pemodelan Suhu pada Reservoir menggunakan Darcy	
LAMPIRAN K <i>Source Code Genetic Algorithm</i>	

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Daftar persamaan properti PVT	27
Tabel 4. 1	Parameter input untuk pemodelan tekanan Beggs-Brill	31
Tabel 4. 2	Tabel parameter input pemodelan tekanan pada reservoir dengan persamaan Darcy	33
Tabel 4. 3	Parameter input perhitungan biaya energi dalam menghasilkan <i>steam</i>	34
Tabel 4. 4	Perhitungan net profit <i>steam injection operation</i>	35
Tabel 4. 5	Pendapatan <i>steam injection operation</i> setelah dioptimasi.....	38
Tabel 4. 6	Parameter optimal pada <i>steam injection operation</i> ...	38
Tabel 4. 7	Pendapatan <i>steam injection operation</i> dengan <i>sucker rod pump</i> setelah dioptimasi.....	42
Tabel 4. 8	Parameter optimal pada <i>steam injection operation</i> dengan <i>sucker rod pump</i>	42
Tabel 4. 9	Perbandingan performansi sebelum dioptimasi, sesudah dioptimasi, dan optimasi dengan penambahan pompa.	423

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi EOR dalam meningkatkan produksi minyak	5
Gambar 2. 2 Fase dalam <i>cyclic steam stimulation</i>	7
Gambar 2. 3 Proses <i>steamflood</i>	8
Gambar 2. 4 Proses insitu <i>combustion enhanced oil recovery</i>	9
Gambar 2. 5 Pola aliran fluida dua fasa dalam pipa vertical	10
Gambar 2. 6 Diagram blok optimasi menggunakan <i>genetic algorithm</i>	21
Gambar 2. 7 Mekanisme <i>crossover</i>	23
Gambar 2. 8 Mekanisme mutasi	23
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	26
Gambar 4. 1 Kurva tekanan terhadap kedalaman pada <i>injection well</i> dengan tekanan input 600 psia, laju aliran massa 2,2 kg/s, dan kualitas 80%	32
Gambar 4. 2 Kurva tekanan terhadap kedalaman pada <i>production well</i> dengan tekanan input 600 psia, laju aliran massa 2,2 kg/s, dan kualitas 80%	32
Gambar 4. 3 Kurva tekanan pada reservoir dengan input 600 psia, laju aliran massa 2,2 kg/s, dan kualitas 80% ..	33
Gambar 4. 4 Kurva analisis sensitifitas perubahan laju aliran massa injeksi	36
Gambar 4. 5 Kurva analisis sensitifitas perubahan tekanan injeksi	36
Gambar 4. 6 Kurva analisis sensitifitas perubahan kualitas uap injeksi	37
Gambar 4. 7 Plot <i>fitness</i> terbaik setiap generasi	38
Gambar 4. 8 Kurva tekanan terhadap kedalaman pada <i>Injection well</i> dengan tekanan input 1165,7 psia, laju aliran massa 5,733 kg/s, dan kualitas 83,82%	39
Gambar 4. 9 Kurva tekanan pada reservoir dengan input 1165,7 psia, laju aliran massa 5,733 kg/s, dan kualitas 83,32%.....	39

- Gambar 4. 10** Kurva tekanan terhadap kedalaman pada *production well* dengan tekanan input 1165,7 psia, laju aliran massa 5,733 kg/s, dan kualitas 83,82% . 40
- Gambar 4. 11** Plot fitness terbaik setiap generasi pada steam flood dengan sucker rod pump 42

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Heavy oil adalah salah satu sumber penting untuk memenuhi kebutuhan energi fosil dimasa depan. Jumlah akumulasi dari *heavy oil* mencapai 3,396 milyar barrel pada OOIP (*Original Oil in Place*). Persebaran ini didominasi didaerah timur tengah, Amerika utara, dan Amerika selatan (Bera, 2015).

Heavy oil memiliki viskositas yang relatif tinggi, hal ini tentu menjadi tidak mudah untuk mengangkat *crude oil* secara efisien dan ekonomis. Sehingga diperlukan cara khusus untuk mendapatkan volume produksi yang tinggi, cara ini disebut sebagai *Enhanced Oil Recovery* (Gu, 2015). Ada beberapa jenis *enhanced oil recovery* (EOR), yaitu *thermal recovery*, *gas recovery*, dan *chemical flood*. Jenis *thermal recovery* yang biasa digunakan untuk *heavy oil* adalah *steam flood*. Uap diinjeksikan pada *injection well*, panas dari *steam* akan terdistribusi pada batuan sehingga dapat menurunkan viskositas *heavy oil*, *steam* yang telah terkondensasi akan memberikan tambahan tekanan sehingga *heavy oil* dapat terdorong ke *production well* (Dutt, 2012).

Uap yang diinjeksikan, diproduksi pada *steam production facility*, jumlah air yang digunakan mencapai 1600 barrel per day atau sekitar 200 ton air setiap hari. Untuk menghasilkan uap dari air sejumlah tersebut, dibutuhkan 8 ton gas alam, atau setara dengan 7662,09 USD setiap hari. Air limbah pada *steam flood operation* adalah air (dalam fasa liquid atau gas) yang terbawa dari reservoir menuju ke *oil production line*. Air limbah ini memiliki campuran kimia yang kompleks meliputi tingginya *Total Dissolved Solid* (TDS), tingginya bahan karbon organik terlarut, dan mineral pembentuk kerak (karbonat, dan sulfat). Kadang pula air limbah *steam flood* mengandung bahan radioaktif alami seperti Ra-226 dan Ra-228 (Fakhrul-Razi, 2009). Air limbah ini membutuhkan penanganan khusus sebelum dapat dibuang atau diinjeksikan kembali. Volume air limbah yang tinggi pada proses *steam flood* EOR akan mengakibatkan tingginya biaya pengolahan air limbah.

Hal ini mengakibatkan *steam flood* memiliki dampak lingkungan yang cukup besar (Allawzi, 2008). *Steam flood* mampu meningkatkan laju produksi minyak mentah dengan meningkatkan laju injeksi uap, namun akan meningkatkan air limbah pada *oil production line*. Meningkatnya injeksi uap tentunya berarti meningkatnya kebutuhan energi untuk menghasilkan uap tersebut.

Melihat permasalahan dalam *steamflood operation* ini, maka diperlukan penelitian mengenai cara mengoptimalkan produksi *crude oil*, energi, dan air limbah pada *steam flood enhanced oil recovery*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan yang diambil dalam tugas akhir ini yaitu:

- Bagaimana memodelkan *steam flood operation* mulai dari *injection well* hingga *production well*?
- Bagaimana mengoptimalkan produksi *crude oil*, dengan meminimalkan energi dan air limbah pada *steam flood enhanced oil recovery* menggunakan *genetic algorithm*?
- Apakah performansi hasil optimasi lebih baik dibandingkan dengan kondisi operasi mula-mula?

1.3. Tujuan

Tujuan dilakukan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Memodelkan *steamflood operation* mulai dari *injection well* hingga *production well*.
- Mengoptimalkan produksi *crude oil*, dengan meminimalkan energi dan air limbah pada *steamflood enhanced oil recovery* menggunakan *genetic algorithm*.
- Membandingkan performa hasil optimasi dengan kondisi operasi mula-mula.

1.4. Lingkup Kerja

Adapun lingkup kerja yang digunakan pada tugas akhir ini adalah pemodelan *steady state* suhu dan tekanan berdasarkan Begg's-Brill pada *well head injection well* hingga reservoir, dan

juga pada reservoir hingga *well head production well*. Pemodelan tekanan menggunakan persamaan Darcy untuk menghitung *pressure gradient* pada reservoir. Hasil dari pemodelan ini divalidasi dengan perangkat lunak PIPESIM, dan COMSOL *Multiphysics*. Estimasi jumlah produksi minyak harian dihitung menggunakan rumus empiris pengaruh gradien tekanan pada reservoir terhadap produksi minyak. Variabel yang dioptimasi adalah laju aliran massa, tekanan injeksi, dan kualitas uap injeksi. *Steam flood operation* dioptimasi dengan menggunakan teknik optimasi *Genetic Algorithm*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

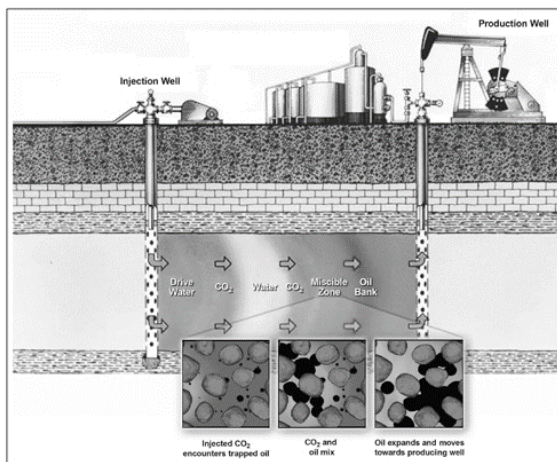
BAB II DASAR TEORI

2.1 *Enhanced Oil Recovery*

Enhanced Oil Recovery (EOR) adalah metode yang digunakan untuk mengeksplorasi minyak dari reservoir setelah dilakukan metode primer dan sekunder. Metode primer adalah metode eksplorasi minyak dari reservoir dengan adanya tekanan dari dalam reservoir itu sendiri. Metode sekunder adalah dengan menambahkan tekanan ke dalam reservoir, yakni dengan menginjeksikan air atau biasa dikenal dengan *water flood*. *Enhanced oil recovery* disebut juga sebagai metoder tersier.

EOR terdiri dari tiga macam, yaitu *thermal recovery*, *gas recovery*, dan *chemical flood*. Namun ada banyak juga metode lain yang saat ini sedang dikembangkan seperti *microbial flood*, *gravity drainager mining*. Metode *thermal recovery* meliputi *cyclic sitmulation* atau *huff-puff stimulation*, *steam flood*, dan *in-situ combustion*. Metode *chemical flood* antara lain *polymer flood*, *micellar-polymer flood* dan *alkaline flood*.

Ilustrasi dari EOR bisa meningkatkan produksi minyak adalah seperti pada Gambar 2.1 (Smith, 2012).



Gambar 2. 1 Ilustrasi EOR dalam meningkatkan produksi minyak

Metode primer mampu mengeksplorasi minyak mentah antara 12-15%. Metode *water flood* mampu meningkatkan 15-20%. Sementara itu EOR mampu menambahkan lagi 4-11% untuk berbagai macam EOR yang dapat diterapkan, baik *thermal*, *chemical*, *microbial*, dan *gravity mining*.

2.2 Thermal Recovery

Salah satu metode EOR adalah *thermal recovery*. Energi panas diinjeksikan ke dalam reservoir untuk menurunkan viskositas, dan juga menambahkan tekanan dalam reservoir. Macam-macam *thermal recovery* adalah *cyclic steam stimulation*, *steam flood*, *steam assisted gravity drainage*, dan *insitu combustion*.

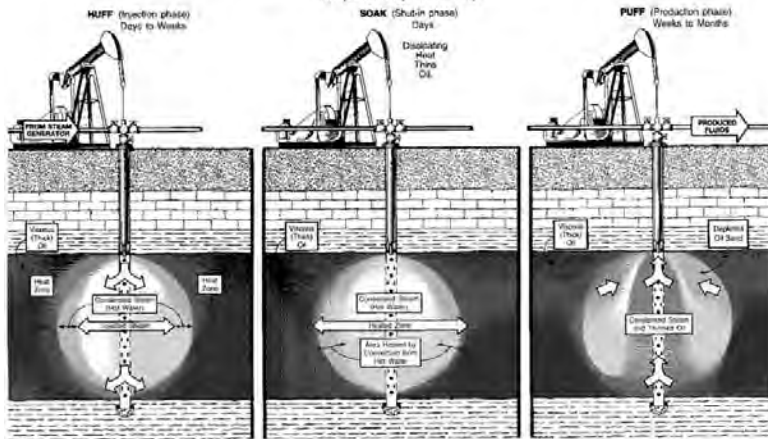
2.2.1. Cyclic Steam Stimulation

Metode ini disebut juga sebagai metode *huff-puff stimulation*. Metode ini menggunakan satu sumur sebagai sumur injeksi sekaligus sumur produksi. Pada metode ini terdapat 3 fase. Fase pertama adalah *injection*, uap dalam kualitas dan jumlah tertentu diinjeksikan ke dalam sumur. Fase kedua adalah *soaking*, pada fase ini uap akan berdifusi ke sekitar sumur memberikan panas pada reservoir sehingga *oil* akan lebih mudah untuk bergerak ke arah sumur. Fase ketiga adalah *production*. Pada fase ini, *well head* kembali dibuka, dan mekanisme *lifting* dijalankan untuk membantu mengangkat fluida atau minyak mentah keluar dari sumur. Ilustrasi metode *cyclic* ini dapat dilihat pada Gambar 2.2 (Smith, 2012).

CYCLIC STEAM STIMULATION

Steam, injected into a well in a heavy-oil reservoir introduces heat that, coupled with alternate "soak" periods, thins the oil allowing it to be produced through the same well. This process may be repeated until production falls below a profitable level.

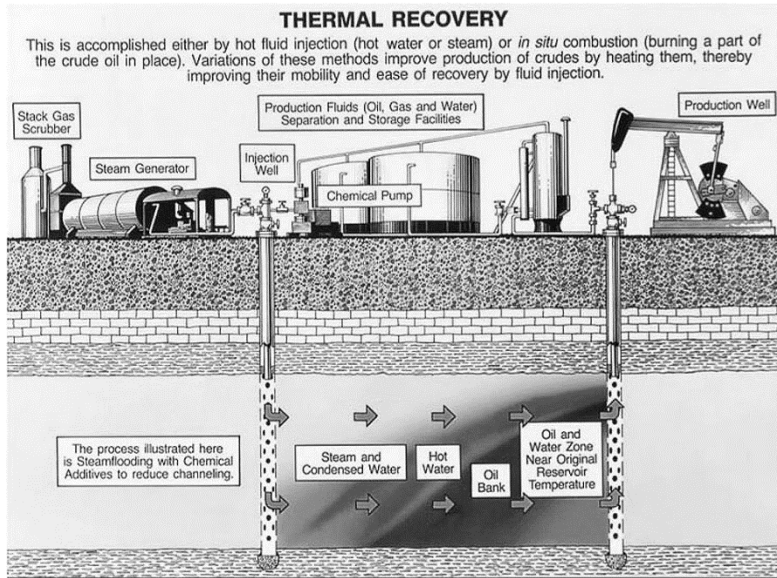
Schematic portrays one well during the 3 phases of this process.
Flow pattern is stylized for clarity.



Gambar 2. 2 Fase dalam *cyclic steam stimulation*

2.2.2. *Steam Flood*

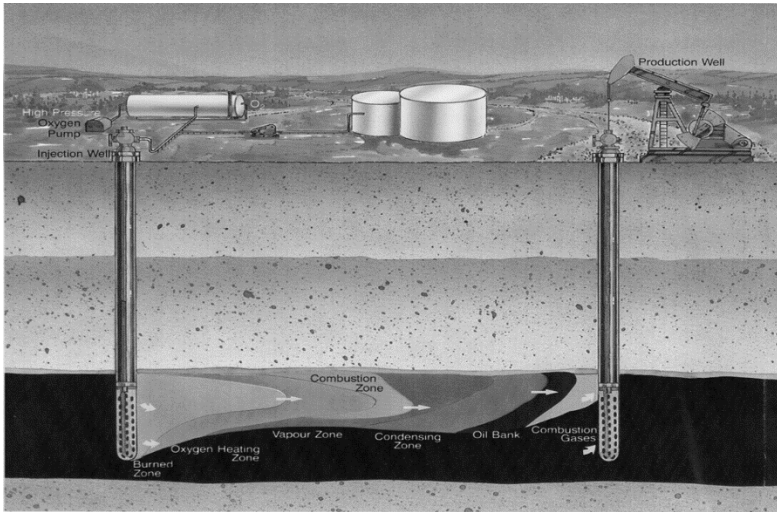
Metode *steam flood* menggunakan dua well, yaitu *injection well* dan *production well*. Pada *injection well*, uap dengan tekanan dan suhu tinggi diinjeksikan ke reservoir. Uap akan melepas panas ketika berada di reservoir, sehingga minyak akan turun viskositasnya. Uap yang sudah terkondensasi juga akan mendorong minyak untuk bergerak ke arah *production well*. Ilustrasi dari *steam flood* dapat dilihat pada Gambar 2.3 (Smith, 2012).



Gambar 2. 3 Proses *steam flood*

2.2.3. *Insitu Combustion*

Pada metode ini, pembakaran dilakukan untuk meningkatkan produksi minyak. Proses ini diawali dengan menurunkan pemanas menuju sumur injeksi. Kemudian udara diinjeksikan kedalam reservoir dan pemanas diaktifkan hingga proses pengapian terjadi. Setelah proses pengapian selesai, pemanas ditarik ke atas, dan dilanjutkan dengan injeksi uap. Uap yang telah terkondensasi akan mendorong minyak yang telah turun viskositasnya akibat pengapian menuju *production well*. Ilustrasi metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Smith, 2012).



Gambar 2.4 Proses insitu *combustion enhanced oil recovery*

2.3 Metode Beggs-Brill

Berdasarkan eksperimen, Beggs-Brill mengajukan persamaan gradien tekanan pada aliran multifase dengan analisis kesetimbangan energi, dan mengasumsikan tidak ada gaya eksternal dari atau terhadap fluida alir. Uraian penurunan persamaan Beggs-Brill ada pada lampiran. Persamaan Beggs-Brill adalah sebagai berikut:

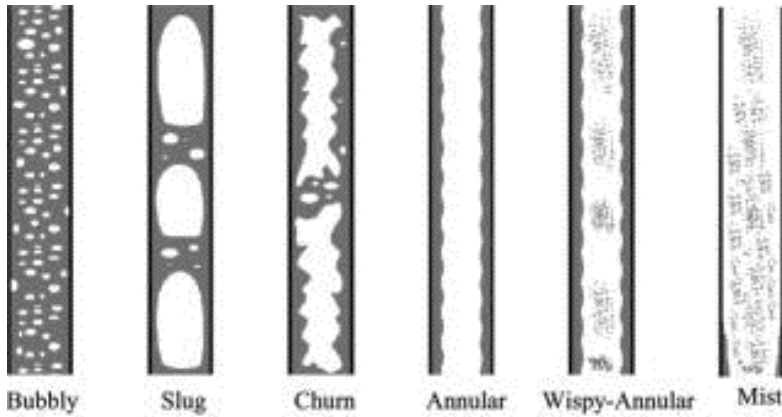
$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{friction} + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{elevation} + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{acceleration} \quad (2.1)$$

Pressure drop pada aliran multifase terjadi karena adanya rugi gesekan atau *friction loss*, perbedaan elevasi atau perubahan energi potensial, dan akselerasi atau perubahan energi kinetik. Namun dikarenakan nilai akibat rugi akselerasi adalah kecil, maka diabaikan (Beggs, 1973).

Friction loss terjadi karena adanya gesekan fluida dengan pipa. *Friction loss* juga dipengaruhi oleh pola aliran, yaitu aliran *segregated*, *intermitted*, dan *distributed*. Pola aliran vertikal dua

fasa dalam tubing dapat dilihat pada Gambar 2.5 (Beggs, 1973). Pada *tubing* yang kasar, dan laju injeksi yang besar, *pressure drop* yang signifikan bisa terjadi bagian dasar *tubing*, dan menyebabkan ekspansi dan akselerasi fase uap. *Pressure drop* akibat gesekan dapat didefinisikan pada persamaan berikut (Beggs, 1973):

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{friction} = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} \quad (2.2)$$



Gambar 2.5 Pola aliran fluida dua fasa dalam pipa vertical

Elevation loss adalah berkurangnya tekanan fluida dikarenakan fluida kehilangan tekanan hidrostatik dan dipengaruhi oleh densitas fluida serta tinggi kolom fluida. Menurut Beggs-Brill, *pressure drop* bisa diprediksi dengan menghitung fraksi *holdup*. Fraksi cairan *holdup* adalah fraksi volume cairan didalam suatu elemen dibandingkan terhadap volume keseluruhan elemen. *Pressure drop* yang diakibatkan oleh elevasi, dinyatakan dalam persamaan berikut (Beggs, 1973):

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{elevation} = \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] \times \sin \theta \quad (2.3)$$

Pada penelitian ini, aliran yang digunakan adalah aliran pada pipa vertikal ke bawah, sehingga sudut kemiringan θ adalah -90° . Maka dengan mensubstitusi ke Persamaan (2.2) dan (2.3), sehingga total *pressure gradient* dinyatakan dalam persamaan berikut (Beggs, 1973):

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} - \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] \quad (2.4)$$

Dengan:

- f_{tp} = faktor gesekan dua fase
- G_m = laju fluks massa campuran ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
- v_m = kecepatan campuran (m/s)
- g_c = faktor gravitasi
- d = diameter aliran (m)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- ρ_L = massa jenis zair (kg/m^3)
- ρ_g = massa jenis gas (kg/m^3)
- H_L = fraksi *Holdup* cair
- θ = sudut kemiringan dari horisontal

Untuk mendapatkan nilai *holdup* pada kemiringan tertentu, dibandingkan nilai *holdup* pada kemiringan tertentu θ , dengan kemiringan 0° . Sehingga *holdup* pada kemiringan tertentu dinyatakan dalam persamaan.

$$\frac{H_L(\theta)}{H_L(0)} = \Psi \quad (2.5)$$

Dengan:

- $H_L(\theta)$ = *holdup* pada kemiringan θ
- $H_L(0)$ = *holdup* pada aliran horisontal
- Ψ = faktor koreksi inklinasi

Faktor koreksi inklinasi dapat diprediksi untuk seluruh kondisi aliran dengan persamaan berikut:

$$\Psi = 1 + C(\sin \emptyset - 1/3 (\sin \emptyset)^3) \quad (2.6)$$

Dengan nilai $\emptyset = 1,8\theta$, pada kasus ini nilai θ adalah -90° karena aliran vertikal kebawah. Nilai koefisien C tergantung pada pola aliran sesuai analisis Beggs-Brill. Persamaan untuk menghitung fraksi *holdup* pada pola aliran *segregated*, *intermittent*, dan *distributed* dinyatakan dalam Persamaan (2.7), (2.8), dan (2.9). Persamaan untuk menghitung koefisien C pada pola aliran *segregated*, *intermittent*, dan *distributed* dinyatakan dalam Persamaan (2.10), (2.11), dan (2.12).

$$H_L(0) = \frac{0.98\lambda^{0.4846}}{N_{FR}^{0.0868}} \quad (2.7)$$

$$H_L(0) = \frac{0.84\lambda^{0.5351}}{N_{FR}^{0.0173}} \quad (2.8)$$

$$H_L(0) = \frac{1.06\lambda^{0.5824}}{N_{FR}^{0.0609}} \quad (2.9)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7N_{LV}^{0.0868}}{\lambda^{0.3692} N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.10)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692} N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.11)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692} N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.12)$$

Pola aliran dapat diprediksi dengan melihat perbandingan bilangan Froude (N_{FR}) dengan konstanta pembatas L_1 dan L_2 dengan kriteria sebagai berikut:

- Jika $N_{FR} < L_1$ maka pola aliran *segregated*.
- Jika $N_{FR} > L_1$ dan $N_{FR} > L_2$ maka pola aliran adalah *distributed*.

- Jika $L_1 < N_{FR} < L_2$ maka pola aliran *intermittent*.
- L_1 dan L_2 dinyatakan dalam Persamaan (2.13) dan (2.14):

$$L_1 = \exp(-4.62 - 3.757X - 0.481X^2 - 0.0207X^3) \quad (2.13)$$

$$L_2 = \exp(1.061 - 4.602X - 1.609X^2 - 0.179X^3 + 0.635 \times 10^{-3}X^5) \quad (2.14)$$

Dengan:

$$X = \ln(\lambda)$$

$$\lambda = \text{input liquid content} = q_L / (q_L + q_g)$$

$$q_L = \text{laju volumetrik zat cair (m}^3/\text{s)}$$

$$q_g = \text{laju volumetrik zat gas (m}^3/\text{s)}$$

Beggs-Brill menggunakan faktor gesekan dua fase (f_{tp}) yang dinormalisasi dengan membagi dengan nilai asumsi tanpa slip yang berlaku apabila fluida mengalir pada kecepatan yang sama. Faktor koreksi tanpa slip diperoleh dari diagram Moody atau untuk pipa yang halus diperoleh dari Persamaan (2.15):

$$f_{ns} = \left[2 \log \left(\frac{N_{Re}}{4.5223 \log(N_{Re} - 3.8215)} \right) \right]^{-2} \quad (2.15)$$

Persamaan untuk mendapatkan faktor gesekan dua fase adalah

$$\frac{f_{tp}}{f_{ns}} = e^S \quad (2.16)$$

Dengan nilai S diperoleh dari:

$$S = \frac{\ln y}{-0.0523 + 3.182 \ln y - 0.8725 (\ln y)^2 + 0.01853 (\ln y)^4} \quad (2.17)$$

$$y = \frac{\lambda}{[H_L(\theta)]^2} \quad (2.18)$$

Untuk nilai interval $1 < y < 1.2$ nilai S dapat ditentukan dengan persamaan:

$$S = \ln(2.2y - 1.2) \quad (2.19)$$

2.4 Dimensionless Number

Dimensionless number adalah angka yang menunjukkan nilai sebuah besaran tanpa dimensi. *Dimensionless number* digunakan dalam tugas akhir ini untuk mensimulasikan fluida yang terjadi di dunia nyata ke dalam bentuk komputasi di dalam komputer. Beberapa *dimensionless number* yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah:

2.4.1. Reynold Number

Reynold number merupakan bilangan tak berdimensi yang merepresentasikan rasio antara gaya inersia dan gaya *viscous*.

$$Re = \frac{\text{Inertia Forces}}{\text{Viscous Forces}} \quad (2.20)$$

Reynold number sering digunakan untuk mempelajari analisis dimensi dari masalah dinamika fluida yang ada di dunia nyata. Selain itu, *reynold number* juga biasa digunakan untuk menentukan perbedaan aliran yang ada:

- *Laminar flow*, terjadi ketika *Reynolds number* dibawah 2000
- *Transition Flow*, terjadi ketika *Reynolds number* diantara 2000 dan 4000
- *Turbulent Flow*, terjadi ketika *Reynold number* diatas 4000.

Reynold number digunakan sebagai angka berbagai situasi dimana fluida yang bergerak dengan berbagai gaya di permukaan. Definisi ini secara umum termasuk pengaruh dari *density* dan *viscosity*, ditambah *velocity* dan karakteristik panjang atau karakteristik dimensi. *Reynold number* dinyatakan dalam

Persamaan (2.21). Dengan Reynold *number* untuk aliran dua fasa, dinyatakan dalam Persamaan (2.22).

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (2.21)$$

$$Re = \frac{(\rho_L \lambda + \rho_g (1 - \lambda)) v_m d}{\mu_L \lambda + \mu_g (1 - \lambda)} \quad (2.22)$$

Dengan:

Re = Reynold *number*

ρ = density (kg/m³)

u = velocity (m/s)

L = characteristic length (m)

μ = dynamic viscosity (Kg/(m.s))

ν = kinematic viscosity (m²/s)

v_m = kecepatan campuran (m/s)

2.4.2. Froude Number

Froude *Number* adalah bilangan tak berdimensi yang mendefinisikan rasio antara inersia aliran dan medan eksternal (pada sebagian besar kasus dikarenakan oleh gravitasi). Dirumuskan dengan:

$$Fr = \frac{v_m^2}{gd} \quad (2.23)$$

Dengan:

v_m = kecepatan campuran (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

d = diameter aliran (m)

Dalam dinamika fluida, Froude *Number* merepresentasikan pola aliran yang berbeda dari fluida yang mengalir pada permukaan yang terbuka. Froude *number* adalah pengukuran karakteristik aliran seperti gelombang, interaksi aliran dan kedalaman pada

penampang atau diantara batuan. Penyebut merepresentasikan kecepatan gelombang kecil di permukaan air relatif terhadap kecepatan air, yang disebut *celerity* gelombang. Pada aliran kritis, *celerity* sama dengan kecepatan aliran. Gangguan apapun pada permukaan akan tetap diam. Pada aliran subkritis, aliran dikendalikan dari titik *downstream* dan ditransmisikan ke *upstream*. Kondisi ini menyebabkan efek *backwater*. Aliran superkritis dikendalikan dari *upstream* dan gangguan ditransmisikan ke *downstream* (Richard, 2004).

2.4.3. Liquid Velocity Number

Liquid Velocity number merupakan bilangan tak berdimensi yang dinyatakan dalam persamaan berikut (Beggs, 1973):

$$N_{LV} = V_{SL} \left(\frac{\rho_L}{g\sigma} \right)^{0,25} \quad (2.24)$$

Dengan:

N_{LV} = liquid velocity number

V_{SL} = superficial liquid velocity = q_L/A_p

ρ_L = densitas zat cair (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

σ = tegangan permukaan air

2.4.4. Gas Velocity Number

Gas Velocity Number merupakan bilangan tak berdimensi yang dinyatakan dengan persamaan berikut (Beggs, 1973):

$$N_{gv} = V_{sg} \left(\frac{\rho_L}{g\sigma} \right)^{0,25} \quad (2.25)$$

Dengan:

N_{gv} = gas velocity number

V_{sg} = superficial gas velocity = q_g/A_p

- ρ_L = densitas zat cair (kg/m^3)
 g = percepatan gravitasi (m/s^2)
 σ = tegangan permukaan air

2.5 Permeabilitas

Permeabilitas adalah kemampuan medium berpori (seperti lapisan batuan pada reservoir) untuk menghantarkan fluida. Semakin besar nilai permeabilitas, semakin besar pula aliran fluida yang dapat dihantarkan melalui medium tersebut. Pada tahun 1856, Henry Darcy melakukan penelitian dan didapatkan hubungan

$$q \propto \Delta P$$

$$q \propto A$$

$$q \propto 1/L$$

Dengan:

q = laju volumetrik aliran fluida (m^3/s)

ΔP = beda tekanan dari titik awal hingga titik akhir (psi)

A = luas area yang dilalui oleh fluida (m^2)

L = Panjang medium yang dilalui (m)

Dari hubungan di atas didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$q = \frac{cA\Delta P}{L} \quad (2.26)$$

Konstanta c didapatkan dari invers proporsional viskositas fluida yang digunakan. Oleh karena itu nilai c diganti dengan k/μ sehingga persamaannya menjadi:

$$q = k \frac{A \Delta P}{\mu L} \quad (2.27)$$

Variabel μ merupakan viskositas fluida. Konstanta k merupakan nilai permeabilitas dari medium dengan dimensi cm^2 . Karena tidak ada batuan yang memiliki nilai permeabilitas sebesar 1 cm^2 , maka dibuat suatu besaran baru yang dinamakan Darcy, dimana $1 \text{ Darcy} = 9,869 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$.

2.6 Pemodelan Transfer Panas pada *Injection* atau *Production Well*

Pada injeksi uap, terjadi perpindahan panas (Q) dari uap ke tubing didalam sumur. Hao Gu (2014), meneliti bagaimana laju perpindahan panas yang terjadi pada proses injeksi uap. Besarnya kalor yang hilang setiap satuan kedalaman, merupakan fungsi dari jari-jari tubing (r_{to}), *Over-all heat transfer coefficient* (U_{to}), suhu uap (T), dan suhu batuan diluar tubing (T_h). Persamaan perpindahan panas ini dinyatakan seperti pada Persamaan (2.28).

$$\frac{dQ}{dZ} = 2\pi r_{to} U_{to} (T - T_h) \quad (2.28)$$

2.7 Pemodelan Transfer Panas pada Reservoir

Uap yang telah diinjeksikan melalui *injection well* akan terdistribusi pada reservoir dengan properti PVT tertentu. Perpindahan panas dari uap ke reservoir menggunakan persamaan kesetimbangan perpindahan panas yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Q_1 = Q_2 + Q_{total\ losses} \quad (2.29)$$

Simbol Q adalah energi panas uap. Subskrip 1 menunjukkan keadaan awal *steam*, dan subskrip 2 menunjukkan keadaan *steam* setelah melalui reservoir. Sementara itu, nilai energi Q_1 dan Q_2 didapatkan dari persamaan:

$$Q_1 = m_{steam} C_{p1} T_1 \quad (2.30)$$

$$Q_2 = m_{steam} C_{p2} T_2 \quad (2.31)$$

Dimana m adalah massa uap, C_p adalah kalor spesifik pada tekanan (P) dan suhu (T) tertentu. Terdapat sejumlah energi yang hilang selama perambatan *steam* dari *injection well* menuju *production well* baik secara konduksi dan konveksi. Energi yang hilang tersebut dapat diturunkan melalui persamaan berikut:

$$Q_{total\ losses} = \frac{T_1 - T_{\infty}}{R_{konduksi} + R_{konveksi}} \quad (2.32)$$

Nilai $R_{konduksi}$ dan $R_{konveksi}$ merupakan hambatan panas konduksi dan konveksi yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_{konduksi} = \frac{L_p}{k A_p} \quad (2.33)$$

$$R_{konveksi} = \frac{1}{h A_p} \quad (2.34)$$

Nilai h adalah *convective heat transfer coefficient* didapat dari persamaan *Nusselt number* yang dilambangkan dengan Nu . *Nusselt Number* dapat diturunkan dari nilai *Reynold number* (Re) dan *Prandalt number* (Pr).

$$Nu = \frac{0.255}{\phi} Re^{2/3} Pr^{1/3} = \frac{h L_p}{k} \quad (2.35)$$

2.8 Genetic Algorithm

Secara umum *Genetic Algorithm* (GA) merupakan teknik pencarian yang digunakan dalam komputasi untuk mencari solusi yang tepat atau perkiraan solusi untuk optimisasi dan masalah pencarian. *Genetic algorithm* memiliki keunggulan-keunggulan dibandingkan dengan metode-metode *heuristic* yang lain, yaitu:

- *Genetic algorithm* menyelesaikan masalah dengan mengkodekan permasalahan menjadi kromosom, bukan dengan menyelesaikan permasalahan itu sendiri. Karena itu diperlukan pemodelan kromosom yang baik dan efektif yang dapat mewakili solusi dari permasalahan yang dihadapi.
- *Genetic algorithm* memulai prosesnya dengan sekumpulan *initial solutions*, berbeda dengan *metaheuristic* lain yang memulai proses dengan sebuah solusi tunggal, dan berlanjut ke solusi lainnya melalui suatu transisi. Karenanya GA melakukan pencarian *multi-directional* dalam *solution space*,

yang memperkecil kemungkinan berhentinya pencarian pada kondisi lokal optimum.

- Hanya diperlukan sebuah fungsi evaluasi tunggal yang berbeda untuk tiap permasalahan.

Suatu *genetic algorithm* standar membutuhkan dua hal untuk didefinisikan, yaitu:

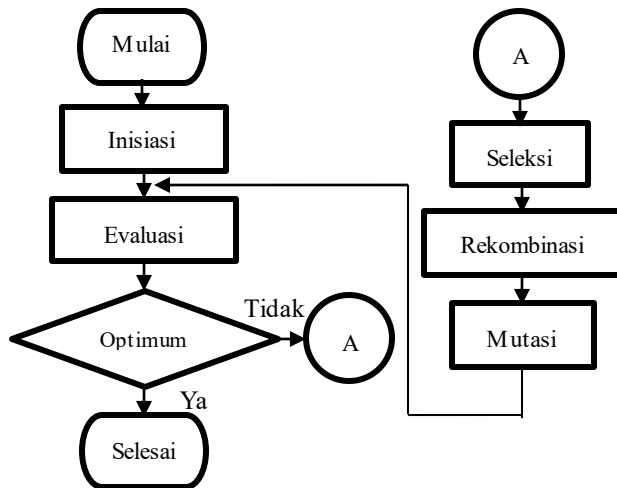
1. Sebuah *genetic representation* dari sebuah *solution domain* (domain solusi),
2. Sebuah *fitness function* untuk mengevaluasi sebuah domain solusi.

Representasi standar dari solusinya adalah sebuah *array of bits* (larik bit). Properti utama yang membuat representasi genetik ini baik adalah bagian-bagiannya yang bisa diakses dengan mudah karena ukuran yang pasti (*fixed*), yang memudahkan suatu operasi persilangan yang sederhana. Representasi panjang variabel juga digunakan disini, tetapi implementasi persilangan jauh lebih sulit pada kasus ini.

Fungsi penghitung nilai kecocokan (*fitness*) didefinisikan pada representasi *genetic* dan digunakan untuk mengukur kualitas (*quality*) pada solusi yang direpresentasikan. Fungsi penghitung ini selalu tergantung pada masalah yang ada (*problem dependent*).

Setelah memiliki representasi genetik dan sebuah fungsi untuk mencari nilai kecocokan (*fitness*) terdefinisi, maka *genetic algorithm* akan melanjutkan untuk membentuk suatu populasi acak, kemudian meningkatkannya melalui aplikasi yang berulang-ulang dari mutasi, persilangan, dan operator seleksi.

Genetic algorithm dapat dituliskan dalam berbagai bahasa pemrograman. Namun tahapan logika yang digunakan dalam GA adalah sama. Diagram alir optimasi menggunakan GA dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Ce'sar, 2013).



Gambar 2. 6 Diagram blok optimasi menggunakan *genetic algorithm*

Tahapan-tahapan *genetic algorithm* di antaranya yaitu:

1. Inisiasi

Populasi awal dari kandidat solusi biasanya dicari secara acak dalam seluruh ruang pencarian. Operasi dari tahapan *genetic algorithm* dilangsungkan dengan menggunakan bilangan biner melalui pengkodean kromosom.

2. Pengkodean kromosom

Kromosom pada GA merupakan solusi dari beberapa variabel. Jenis kode yang digunakan adalah biner, yaitu 0 atau 1. Kromosom diwakili oleh beberapa gen. Kromosom dalam bentuk biner merupakan kromosom genotip dan yang berupa solusi adalah kromosom fenotip. Panjang kromosom genotip ditentukan oleh banyaknya bit untuk merepresentasikan solusi dari suatu model. Genotip kemudian akan dirubah menjadi fenotip berdasarkan *range* yang diberikan kepada variable yang akan dioptimasi. Solusi fenotip dari kromosom

kemudian akan dievaluasi berdasarkan nilai kecocokannya (*fitness*).

3. Evaluasi

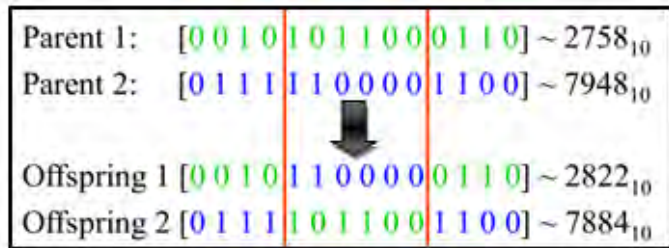
Ketika populasi yang telah diinisiasi atau populasi keturunan terbentuk, nilai *fitness* dari tiap individu dievaluasi. Nilai *fitness* merupakan nilai dari kemampuan solusi untuk bertahan. Apabila hasil evaluasi menunjukkan bahwa solusi belum optimum, maka akan dilanjutkan ke tahap seleksi.

4. Seleksi

Tahap seleksi akan mengalokasikan lebih banyak salinan dari solusi dengan *fitness* yang lebih tinggi dan memberlakukan mekanisme survival dari tiap *fitness* pada tiap kandidat solusi. Gagasan utama dari tahapan seleksi adalah untuk mendapatkan solusi terbaik dari tiap generasi, dan banyak prosedur seleksi telah ditemukan, seperti *roulette-wheel*, *selection stochastic universal*, seleksi *ranking*, seleksi turnamen, dan lain sebagainya.

5. Rekombinasi

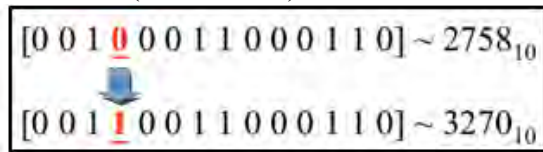
Tahap rekombinasi mengkombinasi bagian dari dua atau lebih solusi induk untuk membentuk individu baru dengan kemungkinan menjadi solusi yang lebih baik. Biasanya rekombinasi menggunakan mekanisme *crossover*. Pada Gambar 2.7 merupakan mekanisme *crossover* dimana pada kromosom induk dipotong oleh *crossover point* sehingga gen-gen pada tiap kromosom bertukar silang dan menghasilkan anak (Ce'sar, 2013).



Gambar 2. 7 Mekanisme *crossover*

6. Mutasi

Ketika rekombinasi beroperasi terhadap dua atau lebih kromosom, mutasi lokal tetapi acak memodifikasi sebuah solusi. Dan juga akan terjadi bermacam-macam mutasi, tapi biasanya melibatkan satu atau lebih perubahan sifat individu. Mekanisme mutasi dapat dilihat pada Gambar 2.8, salah satu gen pada kromosom awal dimutasi sehingga menghasilkan kromosom baru (Ce'sar, 2013).



Gambar 2. 8 Mekanisme mutasi

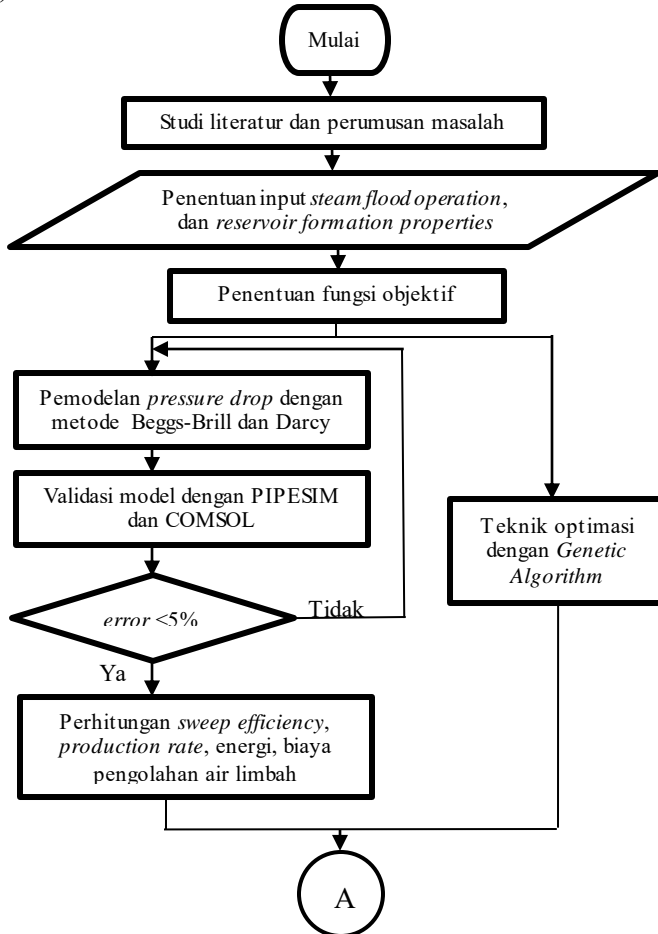
7. Penggantian

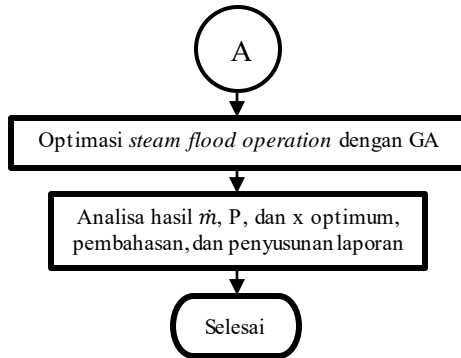
Keturunan hasil dari seleksi, rekombinasi, dan mutasi akan menggantikan populasi induk. Banyak metode penggantian seperti penggantian *elitist*, penggantian *generation-wise*, dan penggantian *steady-state*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Diagram alir dari penelitian ini ditunjukkan pada Gambar (3.1).





Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.1 Penentuan Input *Steam Flood Operation*, dan *Reservoir Formation Properties*

Studi kasus kondisi *steam flood operation* yang digunakan adalah menggunakan data dari Hamaca Field, Venezuela. Kondisi tekanan injeksi sebesar 600 psia, dan kualitas uap 80%. Diameter *injection dan production well* sebesar 0,089 m, kekasaran tubing 0,001 inch dengan kedalam reservoir 1200 m. Laju injeksi 1600 barrel air perhari, atau sekitar 2,2 kg/s.

Suhu formasi batuan 100°F dengan kandungan minyak 11° API. Permeabilitas formasi batuan 1200 mD dengan porositas 0,3. Ketebalan reservoir 30,58 m, dengan jarak antara *injection well* dan *production well* 100 m. Bentuk reservoir diasumsikan berbentuk silinder, dengan tidak ada aliran fluida yang keluar atau masuk ke *control volume* (reservoir).

3.2 Penentuan Fungsi Objektif

Fungsi objektif ditujukan untuk menentukan kearah mana sistem *steam flood* dioptimalkan. Tentunya tujuan dari *steam flood* adalah memaksimalkan laju produksi minyak pada *production well* untuk meningkatkan profit. Jumlah produksi minyak sebanding dengan jumlah uap yang di injeksikan. Namun, semakin banyak uap yang diinjeksikan pada tekanan dan kualitas tertentu, semakin besar energi yang dibutuhkan untuk

menghasilkan uap. Maka semakin besar pula biaya operasional *steam flood*. Selain itu, semakin besar laju injeksi uap akan mengakibatkan semakin banyak volum air limbah pada *oil production line*. Hal ini mengakibatkan meningkatnya biaya *water treatment* sebelum air limbah bisa diinjeksikan kembali. Maka dari itu, biaya akan menjadi fungsi objektif yang akan di maksimalkan.

$$Profit = Pendapatan - Biaya\ steam - Biaya\ water\ treatment \quad (3.1)$$

Dengan masing-masing variabel tersebut didapatkan dari Persamaan (3.3); (3.4); dan (3.11).

3.3 Pemodelan *Pressure Drop* dengan Persamaan Beggs-Brill dan Darcy

Pada *steam flood*, injeksi uap pada sumur injeksi akan mengalami perubahan suhu dan tekanan. Sementara itu, sifat dari fluida juga berubah sesuai dengan perubahan suhu dan tekanan yang terjadi. Maka dari itu sifat air atau steam diturunkan melalui persamaan empiris dalam fungsi suhu (Miller, 1992). Persamaan sifat air ini dirumuskan seperti pada Tabel 3.1 (Miller, 1992).

Hasil pemodelan ini kemudian divalidasi dengan hasil simulasi menggunakan *software PIPESIM*, dan *COMSOL* dengan target rata-rata error pemodelan kurang dari lima persen (*mean error* < 5%).

Tabel 3. 1 Daftar persamaan properti PVT

Properti Uap	Persamaan
Densitas liquid	$\rho_L = 398,942 + 8,288558\sqrt{5335,9562 - T^{1,45}}$
Densitas gas	$\rho_g = EXP[-5,6294 + 0,14564T^{0,8} - 2,1242 \times 10^{-4}T^{1,6} - 7,4288 \times 10^{-6}T^{2,4} + 4,7323 \times 10^{-8}T^{3,2}]$
Viskositas liquid	$\mu_L = EXP[0,484045 - 3,1115 \times 10^{-2}T^{0,95} + 1,3192 \times 10^{-4}T^{1,9} - 2,2934 \times 10^{-7}T^{2,85}]$
Viskositas gas	$\mu_g = 0,0085 + EXP[-7,0661 + 2,1106 \times 10^{-2}T - 7,2058 \times 10^{-5}T^2 + 1,0111 \times 10^{-7}T^3]$
Tegangan permukaan	$\sigma = -0,0957T + 79,15$

3.4 Perhitungan *Sweep efficiency*, *Production Rate*, Energi, dan Biaya Pengolahan Air Limbah

Perhitungan kebutuhan energi untuk menghasilkan *steam* dari air pada suhu 25°C adalah dengan menghitung perubahan entalpi dari keadaan awal hingga keadaan akhir. Entalpi pada keadaan awal adalah entalpi pada suhu 25°C dan 1 atm. Keadaan akhir ditentukan oleh tekanan dan kualitas uap yang akan diinjeksikan, misalkan pada kondisi sebelum dioptimasi yaitu uap basah 80% pada 600 psia. Laju massa uap yang diinjeksikan dinotasikan dalam \dot{m} .

$$\text{Energi} = \dot{m} \times [(h_f + (h_{fg} \times x)) - h_{f\ 25\ C}] \quad (3.2)$$

Untuk mendapatkan biaya dalam menghasilkan energi sejumlah tersebut, digunakan nilai efisiensi pembakaran pada *boiler* yaitu 88% (Gustavsson, 2010). Sementara itu untuk *High Heating Value* (HHV) dari *Natural gas* adalah 54 MJ/kg dengan harga 0,8552\$/kg (Ce'sar, 2013).

$$\text{Biaya uap} = \left(\frac{\text{Energi}}{\eta \times \text{HHV}} \right) \times \text{harga natural gas} \quad (3.3)$$

Penelitian mengenai biaya pengolahan limbah telah dilakukan (Graham, 2015). Dan didapatkan hasil rumus empiris biaya pengolahan limbah dalam fungsi volum limbah, yaitu:

$$\text{Biaya water treatment} = 0,7952 \times \text{volume} - 93,571 \quad (3.4)$$

Laju produksi harian dihitung melalui nilai *sweep efficiency*. *Sweep efficiency* adalah perbandingan antara perbedaan saturasi minyak ketika *steam flood operation*, dengan saturasi minyak mula-mula. Nilai ini merupakan fungsi gradien tekanan. Sehingga volum produksi harian bergantung pada jumlah tekanan dan volum uap yang diinjeksikan. Persamaan *sweep efficiency* dalam fungsi gradien tekanan ditulis dalam Persamaan (3.5). Sehingga pendapatan kotor dari produksi minyak, merupakan perkalian

antara volum produksi dengan harga jual minyak mentah (Xu, 2015).

$$\eta = 0.0739 \times \ln\left(\frac{\Delta P}{L}\right) + 0.7111 \quad (3.5)$$

$$PV = \Phi \times V_{reservoir} \quad (3.6)$$

$$OOIP = S_{oi} \times PV \quad (3.7)$$

$$Cumulative\ production = OOIP \times \eta \quad (3.8)$$

$$t = \frac{PV}{q_{water\ ekuivalen}} \quad (3.9)$$

$$Vol.\ produksi = \frac{Cumulative\ production}{t} \quad (3.10)$$

$$Pendapatan = Vol.\ produksi \times Harga\ jual \quad (3.11)$$

3.5 Optimasi Model dengan GA

Untuk menentukan keadaan optimal *steam flood operation* digunakan *genetic algorithm*. Terdapat 3 variabel yang dioptimasi, yaitu laju aliran massa injeksi (\dot{m}), tekanan injeksi (P), dan kualitas (x) dengan memaksimalkan profit. Satu kromosom terdiri dari 20 bit. Nilai *crossover probability* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah 0,8; *population size* 100; *max. generation* 100; *mutation probability* 0,01; dan *elitism* sebesar 0,95. Hasil individu dengan fitness terbesar akan menjadi solusi yang menghasilkan nilai fungsi objektif yang maksimal.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

1.1. Hasil Pemodelan Tekanan pada *Injection* dan *Production Well* dengan Metode Beggs-Brill

Pemodelan tekanan dengan metode Beggs-Brill dibagi menjadi dua bagian, pada *injection well*, dan pada *production well*. Input untuk pemodelan pada *injection well* dan *production well* disesuaikan dengan kondisi input di Hamaca Field, Venezuela. Kondisi input yang digunakan dalam perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.1 (Dutt, 2012).

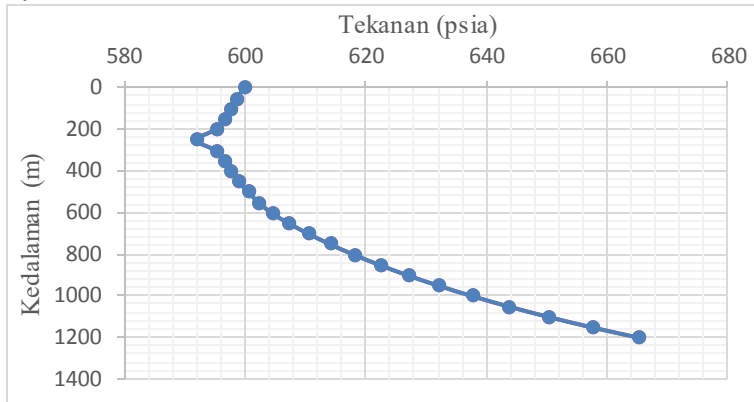
Tabel 4. 1 Parameter input untuk pemodelan tekanan Beggs-Brill

Parameter	Nilai	Satuan
Gravitasi	9,8	m/s ²
Diameter aliran	0,089	m
Kedalaman sumur	1200	m
Tekanan injeksi	600	psia
Kualitas uap injeksi	80	%
Laju massa uap injeksi	2,20814	kg/s
Tebal tubing	0,0365	m
<i>Over-all heat transfer coefficient</i>	2	Btu/h.F.ft2

Pemodelan suhu dan tekanan menggunakan persamaan Beggs-Brill telah divalidasi dengan PIPESIM. Dengan hasil rata-rata *error* = 2,369 %. Hasil validasi ditampilkan pada lampiran.

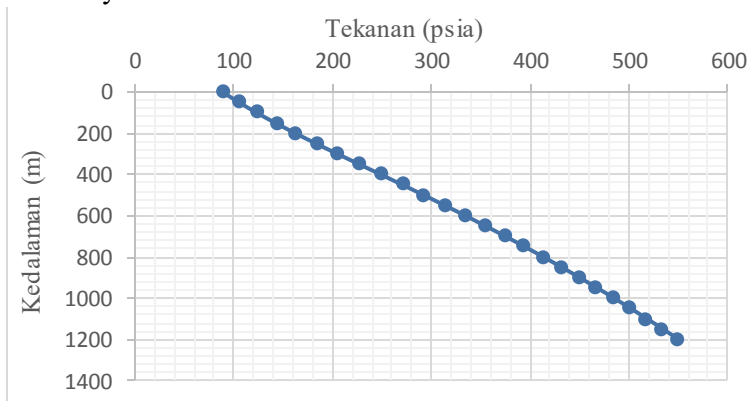
Nilai *error* ini dikarenakan adanya perbedaan kapasitas pencacahan perhitungan model dalam tugas akhir ini, dengan pencacahan yang dilakukan oleh perangkat lunak (PIPESIM dan COMSOL). Pada tugas akhir ini, pencacahan atau segmentasi pada *injection well* dan *production well* dilakukan dengan ketelitian setiap segmen yaitu 50 meter. Sementara itu, perangkat lunak simulasi mampu melakukan pencacahan hingga ketelitian 1 meter. Pencacahan yang semakin kecil tentunya menghasilkan perhitungan yang lebih akurat. Hal ini dikarenakan properti fluida yang berubah sesuai fungsi tekanan dan suhu.

Hasil kurva tekanan pada *injection well* dengan menggunakan persamaan Beggs-Brill dengan fungsi kedalaman sumur dinyatakan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Kurva tekanan terhadap kedalaman pada *injection well* dengan tekanan input 600 psia, laju aliran massa 2,2 kg/s, dan kualitas 80%

Hasil pemodelan tekanan pada *production well* dengan menggunakan persamaan Beggs-Brill dengan fungsi kedalaman sumur dinyatakan dalam Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Kurva tekanan terhadap kedalaman pada *production well* dengan tekanan input 600 psia, laju aliran massa 2,2 kg/s, dan kualitas 80%

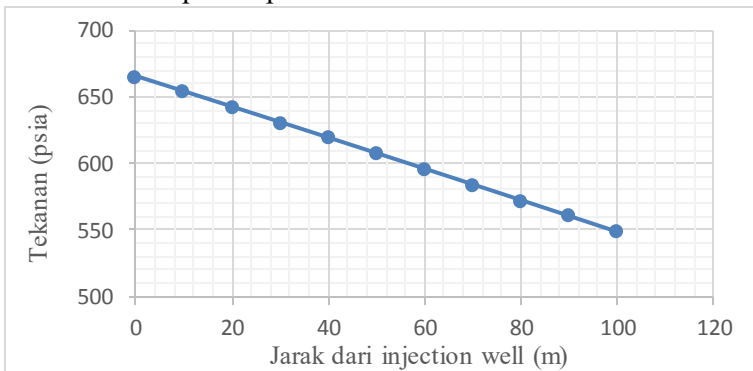
1.2. Hasil Pemodelan Tekanan pada Reservoir dengan Persamaan Darcy

Pemodelan gradien tekanan pada reservoir dimodelkan dengan persamaan Darcy. Karakteristik reservoir yang digunakan sebagai input untuk persamaan Darcy dapat dilihat pada Tabel 4.2 (Dutt, 2012). Pencacahan pada pemodelan ini dilakukan dengan ketelitian 10 meter. Dengan pencacahan yang lebih kecil, mengakibatkan perhitungan dalam model Darcy lebih akurat. Hasil pemodelan telah divalidasi dengan hasil rata-rata *error* 0,39 % terhadap simulasi COMSOL.

Tabel 4. 2 Tabel parameter input pemodelan tekanan pada reservoir dengan persamaan Darcy

Parameter	Nilai	Satuan
Jarak <i>injection</i> - <i>production</i> well	100	m
Tebal formasi	30,48	m
Permeabilitas	1200	mD
Porositas	0,3	-
Deg API	11	° API

Parameter input fluida dalam pemodelan tekanan ini, merupakan output dari fluida pada *injection well*. Karakteristik fluida output dari pemodelan tekanan Darcy, merupakan input untuk pemodelan pada *production well*. Kurva tekanan pada reservoir ditampilkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Kurva tekanan pada reservoir dengan input 600 psia, laju aliran massa 2,2 kg/s, dan kualitas 80%

1.3. Hasil Perhitungan *Sweep Efficiency*, *Production Rate*, *Energi*, dan *Biaya Pengolahan Air Limbah*

Sweep efficiency adalah perbandingan antara perbedaan saturasi minyak setelah *steam flood operation*, dengan saturasi minyak mula-mula. *Sweep Efficiency* didapatkan melalui nilai gradien tekanan fluida pada reservoir. Gradien tekanan fluida pada reservoir dengan kondisi input 600 psia, laju aliran massa 2,2 kg/s, dan kualitas 80% adalah 0,008849107 Mpa/m. Sesuai dengan Persamaan (3.5), maka didapatkan *sweep efficiency* dengan nilai 36,17 %. Sehingga, apabila kondisi laju volume ekuivalen dari uap 1600 barrel per hari, maka laju produksinya minyak mentah adalah 361,086 barrel per hari.

Pendapatan merupakan hasil penjualan minyak mentah per hari, dan dinyatakan dalam Persamaan (3.6). Dengan laju produksi 361,086 barrel per hari, dan harga jual minyak mentah yang digunakan sebagai acuan adalah rata-rata harga minyak mentah jenis WTI pada periode satu tahun (1 April 2015 hingga 1 April 2016), yaitu 45,037 USD/barrel. Maka didapatkan nilai pendapatan 16262,23 USD/hari.

Untuk menghitung biaya untuk menggenerasikan *steam*, digunakan input sesuai Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Parameter input perhitungan biaya energi dalam menghasilkan *steam*

Parameter	Nilai	Satuan
Laju aliran massa injeksi	190784	kg/hari
<i>Enthalpy</i> 80% uap 600 psia	2459,59	kJ/kg
<i>Enthalpy saturated liquid</i> 1 atm	417,43	kJ/kg
Efisiensi <i>boiler</i>	88	%
HHV gas alam	54000	kJ/kg
Biaya gas alam	0,8552	USD/kg

Persamaan (3.2) dan (3.3) disubstitusi dengan nilai parameter input sesuai pada Tabel 4.3. Maka didapatkan hasil, biaya untuk memproduksi *steam* sebesar 7011,22 USD/hari.

Volume air limbah yang terbawa ke *production line* adalah selisih dari volume air yang diinjeksikan, dengan volume minyak yang terangkat. Volume limbah untuk kondisi input sesuai Tabel 4.1 dan 4.2 adalah 133,36 m³/hari. Biaya pengolahan air limbah dihitung menggunakan Persamaan (3.4), sehingga didapatkan biaya 1346,11 USD/hari. Maka perhitungan nilai profit dari *steam flood* pada kondisi operasi standar ditunjukkan pada Tabel 4.4.

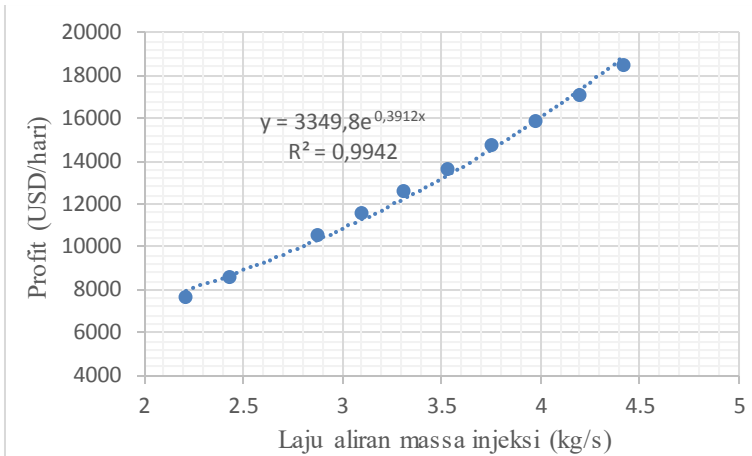
Tabel 4. 4 Perhitungan net profit *steam injection operation*

Parameter	Nilai	Satuan
Biaya <i>steam</i>	7011,22	USD/hari
Penjualan <i>crude oil</i>	16262,23	USD/hari
Biaya <i>water treatment</i>	1346,11	USD/hari
Net profit	7904,89	USD/hari

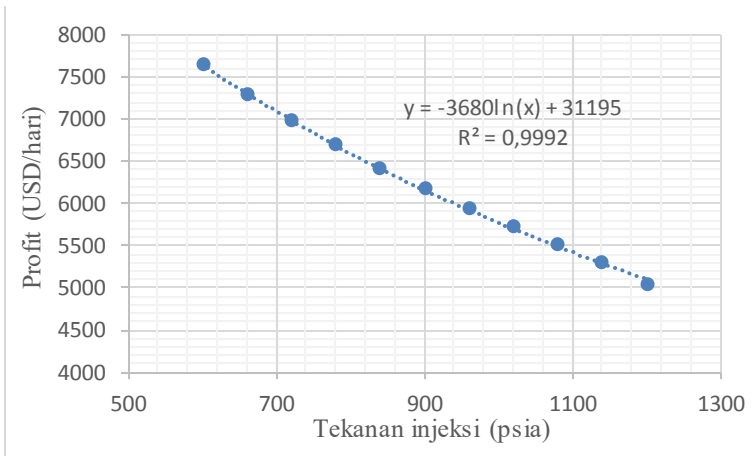
1.4. Analisis Sensitifitas

Analisis sensitifitas bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan salah satu variabel yang dioptimasi (laju aliran massa injeksi, tekanan injeksi, dan kualitas uap) terhadap nilai *objective function* (Net profit). Gambar 4.4 merupakan kurva analisis sensitifitas perubahan laju aliran massa injeksi, dengan tekanan injeksi dan kualitas uap konstan pada kondisi operasi normal. Kurva analisis sensitifitas perubahan tekanan dinyatakan pada Gambar 4.5. Dan kurva analisis sensitifitas terhadap perubahan kualitas uap dinyatakan pada Gambar 4.6.

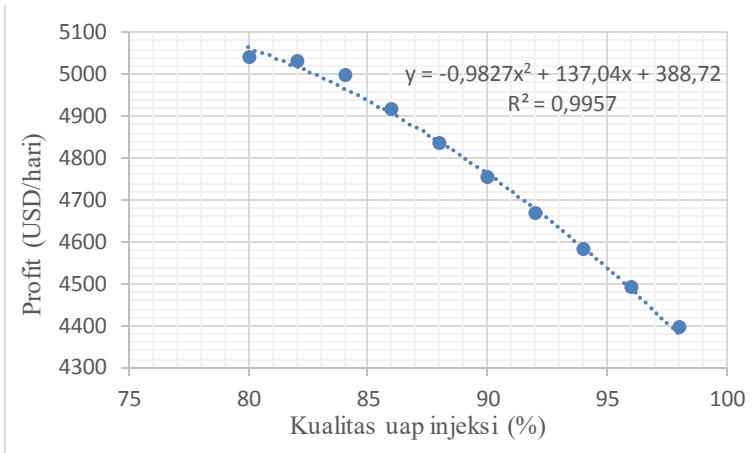
Kenaikan laju aliran massa injeksi akan meningkatkan profit *steamflood operation* secara eksponensial. Peningkatan tekanan injeksi dan kualitas uap, justru mengakibatkan penurunan profit. Hal ini dikarenakan meningkatnya biaya *steam generation* secara signifikan. Sementara itu peningkatan laju aliran massa injeksi perlu diimbangi dengan peningkatan tekanan injeksi. Dikarenakan *driving force* dari aliran steam adalah tekanan. Maka laju aliran yang besar memerlukan tekanan injeksi yang besar pula. Sehingga dibutuhkan kombinasi laju aliran massa, tekanan injeksi, dan kualitas uap yang optimum untuk *steamflood operation*.



Gambar 4.4 Kurva analisis sensitifitas perubahan laju aliran massa injeksi



Gambar 4.5 Kurva analisis sensitifitas perubahan tekanan injeksi

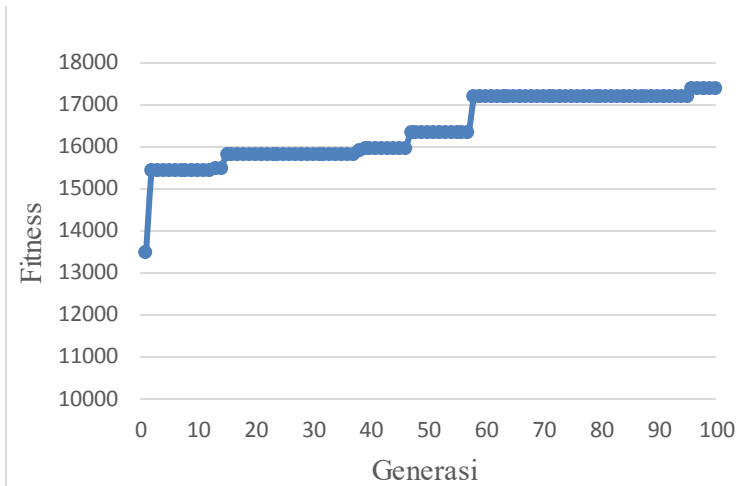


Gambar 4.6 Kurva analisis sensitifitas perubahan kualitas uap injeksi

1.5. Optimasi Menggunakan Genetic Algorithm

Fungsi objektif dari optimasi ini adalah pendapatan bersih, yang merupakan jumlah dari pendapatan dari penjualan *crude oil*, biaya menggenerasikan *steam*, dan biaya *water treatment*. Variabel yang dioptimasi adalah laju aliran massa injeksi, tekanan injeksi, dan kualitas uap injeksi. Metode stokastik *genetic algorithm* digunakan karena banyak terdapat lokal optimum dalam model tersebut. *Constrain* yang digunakan pada optimasi ini adalah tekanan *production well head* lebih dari 100 psia, kapasitas *boiler* maksimal 50 MMBtu/hr, dan kualitas uap lebih dari 80%.

Hasil plot individu dengan fitness terbaik tiap generasi dari optimasi GA pada model *steam flood* adalah seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Plot *fitness* terbaik setiap generasi

Hasil optimasi dengan menggunakan *genetic algorithm* dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Pendapatan *steam injection operation* setelah dioptimasi

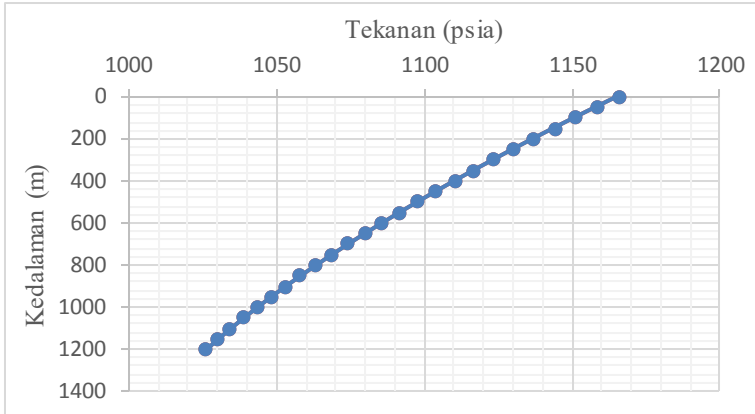
Parameter	Nilai	Satuan
Biaya <i>steam</i>	18791,67	USD/hari
Penjualan <i>crude oil</i>	39886,23	USD/hari
Biaya <i>water treatment</i>	3734,21	USD/hari
Net Profit	17360,34	USD/hari

Variabel input yang digunakan untuk mencapai hasil optimum seperti pada Tabel 4.5 adalah input sesuai Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Parameter optimal pada *steam injection operation*

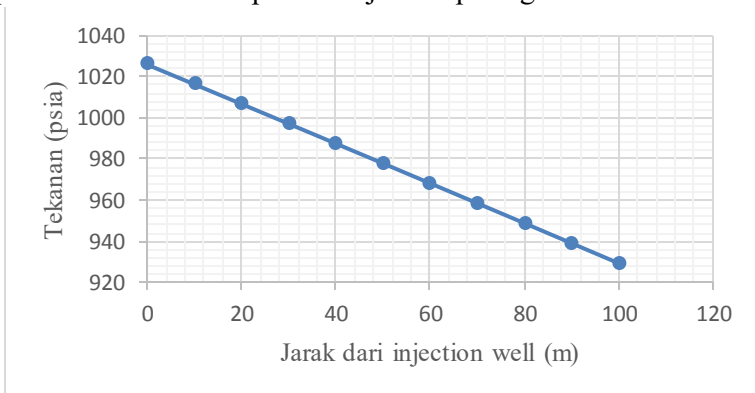
Parameter input	Nilai	Satuan
Tekanan injeksi	1165,70	psia
Kualitas uap injeksi	83,82	%
Laju massa uap injeksi	5,733	kg/s

Dengan parameter input sesuai dengan Tabel 4.6, maka plot dari tekanan steam pada injection well untuk kedalaman tertentu dapat dilihat pada Gambar 4.8.

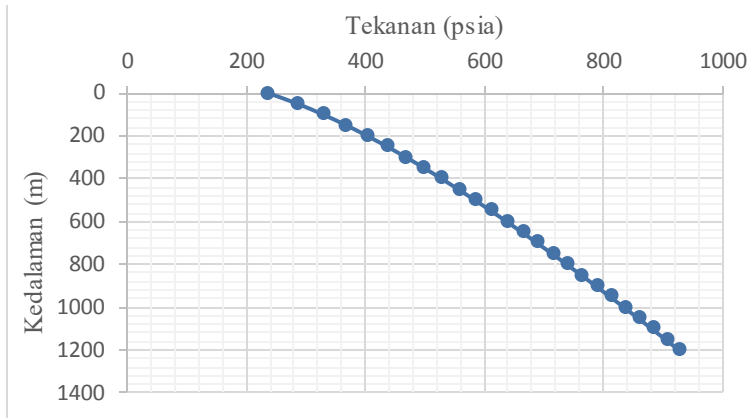


Gambar 4.8 Kurva tekanan terhadap kedalaman pada *Injection well* dengan tekanan input 1165,7 psia, laju aliran massa 5,733 kg/s, dan kualitas 83,82%

Setelah melalui *injection well*, uap akan mengalir pada reservoir dengan plot tekanan sesuai pada Gambar 4.9. Aliran uap dari reservoir menuju ke *production well head* akan mengalami penurunan tekanan seperti ditunjukkan pada gambar 4.10.



Gambar 4.9 Kurva tekanan pada reservoir dengan input 1165,7 psia, laju aliran massa 5,733 kg/s, dan kualitas 83,32%



Gambar 4. 10 Kurva tekanan terhadap kedalaman pada *production well* dengan tekanan input 1165,7 psia, laju aliran massa 5,733 kg/s, dan kualitas 83,82%

1.6. Optimasi *Steam Flood Operation* dengan *Sucker Rod Pump* menggunakan *Genetic Algorithm*

Steam flood operation pada umumnya tidak hanya dengan menginjeksikan uap ke dalam reservoir untuk menurunkan viskositas. Namun juga menggunakan *sucker rod pump* (pompa angguk) untuk membantu mengangkat *heavy crude oil*. Penggunaan pompa angguk dapat menurunkan biaya produksi minyak mentah (Takacs, 2004). Penggunaan pompa angguk memiliki biaya operasional lebih murah dibandingkan menambah tekanan injeksi uap. Pada perhitungan profit produksi minyak pada subbab 4.5, sumur beroperasi dengan belum menggunakan pompa angguk.

Biaya operasional *steam flood* jika menggunakan *sucker rod pump* dihitung dari energi listrik untuk pompa. Untuk menghitung energi listrik untuk pompa, diperlukan perhitungan level dinamik sumur (L_{dyn}), tekanan *intake* pompa (PIP), dan daya hiraulik untuk *lifting* (P_{hyd}) masing-masing sesuai Persamaan (4.1), (4.2), dan (4.3). Biaya operasional *sucker pump rod* adalah hasil perkalian P_e dengan tarif dasar listrik per kWh (0,12 USD/kWh).

$$L_{dyn} = \frac{P_{wh} + 0,433 \times Sp. Gr \ a \times L_{pump} - PIP}{0,433 \times Sp. Gr. \ a - \Delta P_g} \quad (4.1)$$

$$PIP = P_{wh} + \Delta P_g + 0,433 \times Sp. Gr. \ a \times (L_{pump} - L_{dyn}) \quad (4.2)$$

$$P_{hyd} = 7,36 \times 10^{-6} \times q \times Sp. Gr \times L_{dyn} \quad (4.3)$$

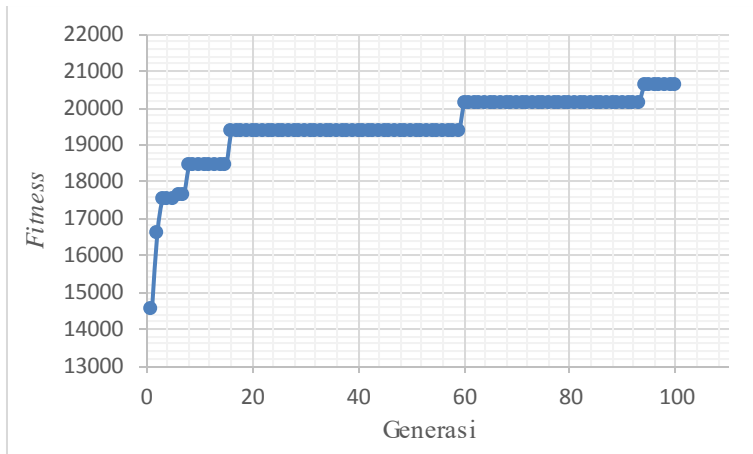
$$P_e = \frac{P_{hyd}}{\eta_{lift} \times \eta_{mech} \times \eta_{mot}} \quad (4.4)$$

Dimana:

L_{dyn}	= Level dinamik didalam anulus sumur (ft)
P_{wh}	= Tekanan <i>well head</i> (psia)
$Sp. Gr \ a$	= <i>Specific gravity</i> annulus
L_{pump}	= Kedalaman pompa (ft)
PIP	= <i>Pump Intake Pressure</i> (psia)
ΔP_g	= <i>Static gas coloum pressure gradient</i> (psia/ft)
P_{hyd}	= Daya hidrolik untuk <i>intake</i> (HP)
P_e	= Daya elektrik motor (HP)

Fungsi objektif dari optimasi ini adalah pendapatan bersih, yang merupakan jumlah dari pendapatan dari penjualan *crude oil*, biaya menggenerasikan *steam*, biaya *water treatment*, dan biaya operasional *sucker rod pump*. Variabel yang dioptimasi adalah laju aliran massa injeksi, tekanan injeksi, dan kualitas uap injeksi. Metode stokastik *genetic algorithm* digunakan karena banyak terdapat lokal optimum dalam model tersebut. *Constrain* yang digunakan pada optimasi ini adalah tekanan *outlet* reservoir lebih dari 100 psia, kapasitas *boiler* maksimal 50 MMBtu/hr, dan kualitas uap lebih dari 80%.

Hasil plot individu dengan *fitness* terbaik tiap generasi adalah seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Plot fitness terbaik setiap generasi pada *steam flood* dengan *sucker rod pump*

Hasil optimasi dengan menggunakan *genetic algorithm* dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Pendapatan *steam injection operation* dengan *sucker rod pump* setelah dioptimasi

Parameter	Nilai	Satuan
Biaya <i>steam</i>	18241,25	USD/hari
Penjualan <i>crude oil</i>	43390,91	USD/hari
Biaya <i>water treatment</i>	3442,93	USD/hari
Net Profit	20605,11	USD/hari

Variabel input yang digunakan untuk mencapai hasil optimum seperti pada Tabel 4.7 adalah input sesuai Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Parameter optimal pada *steam injection operation* dengan *suker rod pump*

Parameter input	Nilai	Satuan
Tekanan injeksi	765,98	psia
Kualitas uap injeksi	84,53	%
Laju massa uap injeksi	5,523	kg/s

4.7. Perbandingan Hasil

Berdasarkan Subbab 4.3, 4.4, dan 4.5 maka perbandingan hasil dinyatakan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Perbandingan performansi sebelum dioptimasi, sesudah dioptimasi, dan optimasi dengan penambahan pompa.

Parameter	Kondisi Awal	Hasil Optimasi	<i>Pump</i> + Optimasi
Tekanan injeksi (psia)	600	1165,70	765,98
Kualitas uap injeksi (%)	80	83,82	84,53
Laju massa uap injeksi (kg/s)	2,20814	5,733	5,523
Biaya <i>steam</i> (USD/hari)	7011,22	18791,67	18241,25
Penjualan <i>crude oil</i> (USD/hari)	16262,23	39886,23	43390,91
Biaya <i>water treatment</i> (USD/hari)	1346,11	3734,21	3442,93
Net profit (USD/hari)	7904,89	17360,34	20605,11

Optimasi *steamflood operation* dapat mengoptimasi net profit dari 7904,89 USD/hari menjadi 17360,34 USD/hari dengan meningkatkan laju aliran massa injeksi (2,20814 kg/s menjadi 5,733 kg/s), meningkatkan tekanan injeksi (600 psia menjadi 1165,7 psia), dan meningkatkan kualitas uap injeksi (80% menjadi 83,82%). Dari hasil tersebut, maka *genetic algorithm* dapat mengoptimasi net profit dari *steam flood operation* hingga 219,63%

Berdasarkan hasil optimasi *steam flood operation* dengan tambahan *sucker rod pump*, dapat meningkatkan profit dari 17360,34 USD/hari menjadi 20605,11 USD/hari. Tidak hanya meningkatkan profit sebesar 18,69%, penambahan *sucker rod pump* juga mampu menurunkan kebutuhan laju aliran injeksi (3,66%), menurunkan tekanan injeksi (34%), menurunkan biaya *water treatment* (7,8%), dan meningkatkan hasil penjualan produksi *crude oil* (8,7%).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN A Daftar Simbol

Tabel A.1 Simbol dan penjelasan

Simbol	Penjelasan
A_p	Luas penampang aliran
C	Koefisien
d	Diameter aliran
f_{ns}	Koefisien gesekan non-slip
f_{tp}	Koefisien gesekan dua fasa
g	Percepatan gravitasi
G_m	Laju fluks massa campuran
g_c	Faktor gravitasi
h	<i>Enthalpy</i>
h_f	<i>Enthalpy pada saturated liquid</i>
h_{fg}	Selisih <i>enthalpy saturated vapor</i> dan <i>saturated liquid</i>
$H_L(0)$	Fraksi <i>Hold-up</i> pada horisontal
$H_L(\theta)$	Fraksi <i>Hold-up</i> pada kemiringan θ
k	Permeabilitas
L	Panjang formasi reservoir
L_1	Konstanta pembatas korelasi 1
L_2	Konstanta pembatas korelasi 2
L_{dyn}	Level dinamik didalam anulus sumur
L_{pump}	Kedalaman pompa
N_{LV}	<i>Liquid velocity number</i>
N_{FR}	Bilangan Froude
N_{Re}	Bilangan Reynold
N_{gv}	Gas velocity number
\dot{m}	Laju aliran massa campuran
\dot{m}_g	Laju aliran massa gas
\dot{m}_L	Laju aliran massa liquid
ρ	Densitas
ρ_g	Densitas gas
ρ_L	Densitas liquid
ρ_{ns}	Densitas pada keadaan non-slip

ρ_{tp}	Densitas dua fasa
P_e	Daya elektrik motor
P_{hyd}	Daya hidraulik untuk <i>intake</i>
P_{wh}	Tekanan <i>well head</i>
PIP	<i>Pump Intake Pressure</i>
ΔP_g	<i>Static gas coloum pressure gradient</i>
q_g	Laju aliran volumetric gas
q_L	Laju aliran volumetrik liquid
Q	Kalor
r_{to}	Jari-jari luar tubing
$R_{konduksi}$	Hambatan perpindahan panas konduksi
$R_{konveksi}$	Hambatan perpindahan panas konveksi
$Sp. Gr\ a$	<i>Specific gravity annulus</i>
T	Suhu
T_h	Suhu formasi batuan diluar sumur
U_{to}	<i>Over-all heat transfer coefficient</i>
μ	Viskositas
μ_G	Viskositas gas
μ_w	Viskositas Liquid
V_{SL}	<i>Superficial liquid velocity</i>
V_{sg}	<i>Superficial gas velocity</i>
v_m	Kecepatan campuran
x	Kualitas uap
z	Kedalaman
ψ	Faktor koreksi inklinasi
η	Efisiensi
η_{lift}	Efisiensi mekanisme <i>lifting</i>
η_{mech}	Efisiensi mekanik
η_{mot}	Efisiensi motor
λ	<i>Input liquid content</i>
σ	Tegangan permukaan

LAMPIRAN B Penurunan Rumus Beggs-Brill

Dasar penurunan aliran fluida adalah kesetimbangan energi pada fluida yang mengalir antara dua titik. Dengan mengasumsikan tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada fluida. Bentuk *steady state* energi mekanik dari sistem aliran fluida dinyatakan dalam Persamaan (1).

$$\frac{dp}{\rho_{tp}} + \frac{g}{g_c} dh + \frac{v_m \cdot d(v_m)}{g_c} + d(w_f) = 0 \quad (1)$$

Dengan $d(w_f)$ adalah rugi gesekan *irreversible*. Pada aliran fluida vertikal keatas atau kebawah, maka berlaku Persamaan (2).

$$dh = \sin \theta \cdot dZ \quad (2)$$

Dengan dh adalah jarak perpindahan vertikal, θ adalah sudut kemiringan pipa terhadap horizontal, dan dZ adalah jarak perpindahan axial. Substitusi Persamaan (1) dan (2) adalah Persamaan (3).

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) = - \left(\frac{g}{g_c} \rho_{tp} \sin \theta + \rho_{tp} \frac{v_m \cdot d(v_m)}{g_c \cdot dZ} + \rho_{tp} \frac{d(w_f)}{dZ} \right) \quad (3)$$

Komponen dalam Persamaan (3) merepresentasikan rugi akibat gesekan, elevasi, dan gravitasi. Nilai rugi gravitasi diabaikan karena nilainya relative kecil.

Gradien tekanan akibat gesekan

Pada aliran dua fasa, densitas tanpa slip akan bernilai berbeda dengan densitas sebenarnya dikarenakan gesekan antar fasenya. Densitas tanpa gesekan digunakan dalam perhitungan rugi gesekan dikarenakan adanya perpindahan energi dari suatu tempat. Persamaan *friction loss* dinyatakan dalam persamaan (4).

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{friction} = -\left(\rho_{tp} \frac{dw_f}{dZ}\right) \quad (4)$$

Dengan hubungan untuk menyelesaikan persamaan tersebut adalah:

$$\rho_{tp} = \rho_L \cdot H_L + \rho_G \cdot (1 - H_L) \quad (5)$$

$$\rho_{ns} = \rho_L \cdot \lambda + \rho_G \cdot (1 - \lambda) \quad (6)$$

$$\frac{d(w_f)}{dZ} = \frac{f_{tp} \cdot v_m^2}{2 \cdot g_c \cdot d} \quad (7)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4), (5), (6), dan (7) maka diperoleh Persamaan (8).

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{friction} = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} \quad (8)$$

Gradien tekanan akibat elevasi

Sesuai dengan persamaan (3), maka gradien tekanan akibat elevasi dinyatakan dalam persamaan (9).

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{g}{g_c} \rho_{tp} \sin \theta \quad (9)$$

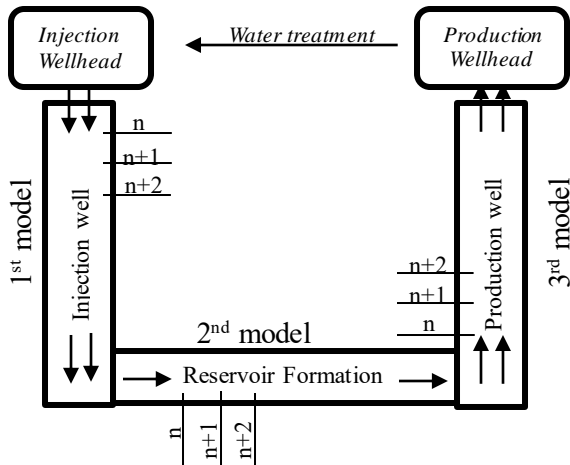
Untuk menentukan densitas in-situ dari campuran gas-liquid, maka perlu dihitung nilai fraksi *Holdup* dinyatakan dalam persamaan (10).

$$H_L = \frac{\text{Volume of liquid element}}{\text{Volume of the element}} \quad (10)$$

Nilai densitas insitu dinyatakan dalam persamaan (5). Maka bentuk substitusi persamaan (9) dan (5) adalah.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{el} = \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_G (1 - H_L)] \cdot \sin \theta \quad (11)$$

LAMPIRAN C Contoh Perhitungan *Pressure Drop* menggunakan Beggs-Brill pada *Injection Well*



Gambar C.1 Segmentasi model *steam flood operation*

Segmentasi model *steam flood operation* dilakukan seperti pada Gambar C.1. Berikut ini adalah perhitungan segmen pertama (n) pada *injection well*, dengan panjang segment 50 m. Input kondisi operasi yang digunakan adalah sesuai pada table berikut ini:

Tabel C.1. Kondisi input pemodelan Beggs-Brill

Parameter	Nilai	Satuan
Gravitasi	9,8	m/s ²
Diameter aliran	0,09	m
Kedalaman sumur	1200	m
Tekanan injeksi	600	psia
Kualitas uap injeksi	80	%
Laju massa uap injeksi	2,20814	kg/s
Tebal tubing	0,0365	m
Koefisien perpindahan panas	2	Btu/h.F.ft2

Sementara itu, rumus untuk menghitung *pressure drop* adalah:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} - \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] \quad (1)$$

Untuk menghitung nilai *pressure drop* diperlukan perhitungan variable lain dengan urutan tahap perhitungan sebagai berikut.

- Menghitung q_L dan q_g

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_L$$

- $\dot{m}_g = x \times \dot{m}$

$$\dot{m}_g = 0,8 \times 2,208148$$

$$\dot{m}_g = 1,766518$$

$$q_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g}$$

$$q_g = \frac{1,766518}{20,79883}$$

$$q_g = 0,0849335$$

- $\dot{m}_L = (1 - x) \times \dot{m}$

$$\dot{m}_L = (1 - 0,8) \times 2,208148$$

$$\dot{m}_L = 0,441629$$

$$q_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L}$$

$$q_L = \frac{0,441629}{795,360643}$$

$$q_L = 0,0005552$$

- Menghitung ρ_L dan ρ_g

$$\rho_L = 398,942 + 8,288558\sqrt{5335,9562 - T^{1,45}}$$

$$\rho_L = 795,3606$$

$$\rho_g = EXP[-5,6294 + 0,14564T^{0,8} - 2,1242 \\ \times 10^{-4}T^{1,6} - 7,4288 \times 10^{-6}T^{2,4} \\ + 4,7323 \times 10^{-8}T^{3,2}]$$

$$\rho_g = 20,79883$$

- Menghitung λ

$$\lambda = q_L / (q_L + q_g)$$

$$\lambda = 0,000555 / (0,000555 + 0,084933)$$

$$\lambda = 0,006495086$$

- Menghitung v_m

$$v_m = \frac{(q_L + q_g)}{A}$$

$$v_m = \frac{(0,000555257 + 0,084933542)}{0,0063585}$$

$$v_m = 13,44480597$$

- Menghitung σ

$$\sigma = 0,07275 \times (1 - 0,002 \times (T - 291))$$

$$\sigma = 0,07275 \times (1 - 0,002 \times (525,51031 - 291))$$

$$\sigma = 0,038628749$$

- Menghitung V_{SL}

$$V_{SL} = \frac{q_L}{A}$$

$$V_{SL} = \frac{0,000555257}{0,0063585}$$

$$V_{SL} = 0,087325168$$

- Menghitung N_{LV}

$$N_{LV} = V_{SL} \left(\frac{\rho_L}{g\sigma} \right)^{0,25}$$

$$N_{LV} = 0,087325168 \left(\frac{795,360643}{9,8 \times 0,038628749} \right)^{0,25}$$

$$N_{LV} = 0.591$$

- Menghitung N_{Fr}

$$Fr = \frac{v_m^2}{gd}$$

$$Fr = \frac{13,444^2}{9,8 \times 0,09}$$

$$Fr = 204,94$$

- Menghitung $H_L(0)$

- Jika $N_{FR} < L_1$ maka pola aliran *segregated*.
- Jika $N_{FR} > L_1$ dan $N_{FR} > L_2$ maka pola aliran adalah *distributed*.
- Jika $L_1 < N_{FR} < L_2$ maka pola aliran *intermittent*.
- L_1 dan L_2 dinyatakan dalam persamaan:

Dimana:

$$X = \ln(\lambda)$$

$$X = \ln(0,00649)$$

$$X = -5,03670942$$

$$L_1 = \exp(-4,62 - 3,757X - 0,481X^2 - 0,0207X^3)$$

$$L_1 = \exp(-4,62 - 3,757 \times -5,036 - 0,481 \times (-5,036)^2 - 0,0207X \times (-5,036)^3)$$

$$L_1 = 115,0777074$$

$$L_2 = \exp(1,061 - 4,602X - 1,609X^2 - 0,179X^3 + 0,635 \times 10^{-3}X^5)$$

$$L_2 = \exp(1,061 - 4,602 \times (-5,036) - 1,609 \times (-5,036)^2 - 0,179 \times (-5,036)^3 + 0,635 \times 10^{-3} \times (-5,036)^5)$$

$$L_2 = 69,08013579$$

Nilai $N_{Fr} >$ dari L_1 dan L_2 , sehingga pola aliran nya adalah distributed.

$$H_L(0) = \frac{1,06\lambda^{0,5824}}{N_{FR}^{0,0609}}$$

$$H_L(0) = \frac{1,06(0,00649)^{0,5824}}{(204,94)^{0,0609}}$$

$$H_L(0) = 0,040984547$$

- Menghitung Ψ

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4,7 N_{LV}^{0,1244}}{\lambda^{0,3692} N_{FR}^{0,5056}} \right]$$

$$C = (1 - 0,00649) \ln \left[\frac{4,7 \times 0,591^{0,1244}}{0,00649^{0,3692} \times 0,591^{0,5056}} \right]$$

$$C = 2,3691$$

$$\Psi = 1 + C (\sin \emptyset - 1/3 (\sin \emptyset)^3)$$

$$\Psi = 1 + 2,3691 \times (\sin \emptyset - 1/3 (\sin \emptyset)^3)$$

$$\Psi = 1,912124065$$

Dengan nilai $\emptyset = 1,8\theta$, pada kasus ini nilai θ adalah -90° karena aliran vertikal kebawah

- Menghitung $H_L(\theta)$

$$\frac{H_L(\theta)}{H_L(0)} = \Psi$$

$$H_L(\theta) = \Psi \times H_L(0)$$

$$H_L(\theta) = 1,912124065 \times 0,040984547$$

$$H_L(\theta) = 0,078367539$$

- Menghitung S

$$y = \frac{\lambda}{[H_L(\theta)]^2}$$

$$y = \frac{0,006495086}{[0,078367539]^2}$$

$$y = 1,057578155$$

$$S = \frac{\ln y}{-0,0523 + 3,182 \ln y - 0,8725(\ln y)^2 + 0,01853(\ln y)^4}$$

$$S = 0,454768139$$

- Menghitung f_{ns}
Diperlukan nilai Reynold *number* untuk menghitung variable ini, nilai Reynold *number* untuk aliran dua fasa didapatkan melalui persamaan berikut ini.

$$N_{Re} = \frac{[\rho_L \cdot \lambda + \rho_g \cdot (1 - \lambda) \cdot v_m \cdot d]}{\mu_L \cdot \lambda + \mu_g \cdot (1 - \lambda)}$$

$$N_{Re} = \frac{[795,3 \times 0,00649 + 20,7 \times (1 - 0,00649) \times 13,44 \times 0,09]}{0,000105 \times 0,00649 + 1,758E - 05 \cdot (1 - 0,00649)}$$

$$N_{Re} = 1721873,766$$

$$f_{ns} = \left[2 \log \left(\frac{N_{Re}}{4,5223 \log(N_{Re} - 3,8215)} \right) \right]^{-2}$$

$$f_{ns} = \left[2 \log \left(\frac{1721873,766}{4,5223 \log(1721873,766 - 3,8215)} \right) \right]^{-2}$$

$$f_{ns} = 0,010632614$$

- Menghitung f_{tp}

Berdasarkan, maka diperlukan nilai f_{ns} dan S .

$$\frac{f_{tp}}{f_{ns}} = e^S$$

$$f_{tp} = f_{ns} \cdot e^S$$

$$f_{tp} = 0,010632614 \cdot e^{0,454768139}$$

$$f_{tp} = 0,016754959$$

- Menghitung G_m

$$G_m = \frac{\dot{m}_g + \dot{m}_L}{A}$$

$$G_m = \frac{2,208148}{0,0063585}$$

$$G_m = 347,2750095$$

- Menghitung $\frac{\partial p}{\partial z}$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} - \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)]$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = & \frac{0,016754959 \times 347,2750095 \times 13,44480597}{2 \times 9,80665 \times 0,09} \\ & - \frac{9,8}{9,80665} [795,3606 \times 0,078367539 \\ & + 20,79883(1 - 0,078367539)] \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = 173,4597611 \frac{Pa}{m}$$

Sehingga apabila tekanan injeksi 600 psia, dengan *pressure drop* $173,459 \frac{Pa}{m}$, maka output tekanan segment pertama (segment n) adalah 598,742 psia. Dengan nilai tekanan ini, maka temperature juga akan berubah dari 252,36 °C menjadi 252,23 °C. Perubahan tekanan dan suhu ini mengakibatkan perubahan pada semua properties steam, maka dari itu output segment n, akan menjadi input untuk segment n+1 dan seterusnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN D Contoh Perhitungan *Pressure Drop* menggunakan Darcy pada Reservoir *Formation*

Parameter input yang digunakan dalam perhitungan *pressure drop* pada *reservoir formation* adalah seperti pada tabel berikut:

Tabel D.1. Kondisi input pemodelan reservoir dengan Darcy

Parameter	Nilai	Satuan
Jarak <i>injection-production well</i>	100	m
Tebal formasi	30,48	m
Permeabilitas	1200	mD
Porositas	0,3	-
Deg API	11	° API

Persamaan Darcy mengenai permeabilitas adalah pada persamaan 2.20. Dengan nilai yang dicari adalah ΔP .

$$q = \frac{cA\Delta P}{\mu L}$$

$$\Delta P = \frac{\mu q L}{cA}$$

- Menghitung μ pada $T=531,768$ K

$$\mu_L = EXP[0,484045 - 3,1115 \times 10^{-2}T^{0,95} + 1,3192 \times 10^{-4}T^{1,9} - 2,2934 \times 10^{-7}T^{2,85}]$$

$$\mu_G = 0,0085 + EXP[-7,0661 + 2,1106 \times 10^{-2}T - 7,2058 \times 10^{-5}T^2 + 1,0111 \times 10^{-7}T^3]$$

$$\mu_L = 0,000102276$$

$$\mu_G = 1,78232E - 05$$

$$\mu = x \times (\mu_G - \mu_L) + \mu_L$$

$$\mu = 0,2660 \times (1,782E - 05 - 0,000102) + 0,000102$$

$$\mu = 7,98089E - 05$$

- Menghitung q

$$q = (q_L + q_g)$$

$$q = 0,085488799$$

- Menghitung L

L merupakan panjang segmen, yaitu ditentukan sebesar 10 m. Dengan jarak total segmen merupakan jarak antara injection well dan production well, yaitu 100 m.

$$L = 10$$

- Menghitung c atau k

$$k = 1200 \text{ mD}$$

$$k = 1,2 \text{ D} \times 9,869E - 9 \text{ cm}^2$$

$$k = 11,8428E - 12 \text{ m}^2$$

- Menghitung A

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times 30,48^2}{4}$$

$$A = 729,288864$$

- Menghitung ΔP

$$\Delta P = \frac{\mu q L}{c A}$$

$$\Delta P = \frac{(7,98089E - 05)(0,08548879)(10)}{(11,18428E - 12)(729,288)}$$

$$\Delta P = 78996,29097 \text{ Pa} = 11,45746405 \text{ psi}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 0,007899646 \text{ Mpa/L}$$

Nilai gradien ini merupakan gradien tekanan pada segmen pertama (n) pada reservoir. Perubahan tekanan dan suhu ini mengakibatkan perubahan pada semua properties *steam*, maka dari itu output segment n, akan menjadi input untuk segment n+1 dan seterusnya.

Untuk nilai gradien tekanan yang digunakan dalam menghitung *sweep efficiency*, diperlukan nilai rata-rata gradien tekanan pada seluruh segment.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN E Contoh Perhitungan *Heat Transfer* pada *Injection Well*

Perhitungan perpindahan panas pada *injection* dan *production well* dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{dQ}{dz} = 2\pi r_{to} U_{to} (T_s - T_h)$$

$$\frac{dQ}{dz} = 2\pi \times 0,1197 \times 0,00166 (486,248 - 112)$$

$$\frac{dQ}{dz} = 0,469079508 \frac{Btu}{ft}$$

Nilai besar energi yang hilang menurut perhitungan diatas terjadi pada segment pertama (50 m pertama). Pada segmen kedua, nilai suhu uap sudah berubah, maka diperlukan perhitungan kembali untuk menentukan besar energi yang hilang. Nilai energi yang hilang tiap kedalaman ini digunakan pula untuk menentukan nilai kualitas uap untuk segment selanjutnya. Dengan perhitungan sebagai berikut:

$$Q_{steam} = \dot{m} \times (h_L + x \cdot h_{fg})$$

$$Q_{steam} = 2,2081 \times (1097,192278 + 0,8 \times 2800,199)$$

$$Q_{steam} = 5431,156407 \text{ kJ}$$

$$Q_{steam}' = Q_{steam} - Q_{loss}$$

$$Q_{steam}' = 5431,1564 - 81,1852$$

$$Q_{steam}' = 5349,9711 \text{ kJ}$$

$$h = \frac{Q_{steam}'}{\dot{m}}$$

$$h = \frac{5349,9711}{2,2081}$$

$$x = \frac{(h - h_L)}{h_{fg}}$$

$$x = \frac{(5349,9711 - 1096,579586)}{2800,245712}$$

$$x = 0,77846$$

Perhitungan ini dilangsungkan sesuai segmentasi yang dilakukan dalam perhitungan. Dengan output segment ke-n, akan menjadi input untuk segmen ke n+1.

LAMPIRAN F Contoh Perhitungan *Heat Transfer* pada Reservoir

Untuk menghitung total energi yang hilang dalam perpindahan aliran uap di reservoir, maka diperlukan input karakteristik batuan sebagai berikut:

Tabel F.1. Kondisi input *heat transfer* pada reservoir

Input	Nilai
Konduktivitas termal (k)	1,73 W/mK
Luas penampang aliran steam pada reservoir (A)	729,2888 m ²
Jarak injection well dan production well (L)	100 m
Porositas (φ)	0,3
Viskositas uap (μ)	7,9809E-05 Pa.s

Perhitungan *heat loss* melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

- Menghitung panjang karakteristik (L_p)

$$L_p = \sqrt[3]{A \times L}$$

$$L_p = \sqrt[3]{729,2888 \times 100}$$

$$L_p = 41,77981642$$

- Menghitung hambatan konduksi ($R_{konduksi}$)

$$R_{konduksi} = \frac{L_p}{k A_p}$$

$$R_{konduksi} = \frac{41,77981642}{1,73 \times 729,2888}$$

$$R_{konduksi} = 0,033114701$$

- Menghitung Prandl Number (Pr)

$$Pr = \frac{\mu}{Cp.k}$$

$$Pr = \frac{7,98089E - 05}{4264,4261 \times 1.73}$$

$$Pr = 0,196727901$$

- Menghitung Nusselt Number (Nu)

$$Nu = \frac{0,255}{\phi} Re^{2/3} Pr^{1/3}$$

$$Nu = \frac{0,255}{0,3} (1292908,446)^{2/3} (0,196727901)^{1/3}$$

$$Nu = 5867.045103$$

- Menghitung *enthalpy* (h)

$$Nu = \frac{h L_p}{k}$$

$$h = \frac{Nu.k}{L_p}$$

$$h = \frac{5867,045 \times 1.73}{41,77981642}$$

$$h = 242,9399863$$

- Menghitung hambatan konveksi ($R_{konveksi}$)

$$R_{konveksi} = \frac{1}{h A_p}$$

$$R_{konveksi} = \frac{1}{242,9399863 \times 729,2888}$$

$$R_{konveksi} = 5,64419E - 06$$

- Menghitung *loss energi* ($Q_{total losses}$)

$$Q_{total losses} = \frac{T_1 - T_{\infty}}{R_{konduksi} + R_{konveksi}}$$

$$Q_{total\ losses} = \frac{258,6188515}{0,033114701 + 5,64419E - 06}$$

$$Q_{total\ losses} = 7808,458\ J$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN G Validasi Pemodelan Suhu dan Tekanan menggunakan Beggs-Brill pada *Injection Well*

Validasi model *injection well* dilakukan terhadap hasil pemodelan dengan *software* Schlumberger PIPESIM. Pada Tabel G.1, divariasikan nilai laju aliran massa injeksi uap, terhadap tekanan dan kualitas uap yang konstan (600 psia; 80%). Nilai variasi merupakan tambahan atau gain 10% terhadap nilai keadaan awal (2,208 kg/s).

Tabel G.1 Validasi model terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m (kg/s)	PIPESIM		Model Beggs and Brill		% error P	% error T
	P out (psia)	T out (F)	P out (psia)	T out (F)		
2,208	624,7638	490,6204	635,9041	492,5439	1,78	0,39
2,428	601,6787	486,5492	604,2838	487,0146	0,43	0,09
2,649	576,7292	482,0126	568,6825	480,5174	1,39	0,31
2,870	549,365	476,8607	534,9777	474,07	2,61	0,58
3,091	518,9689	470,902	500,3863	467,1262	3,58	0,80
3,312	484,7678	463,8685	461,3931	458,8391	4,82	1,08
3,533	445,6765	455,3463	416,7041	448,6513	6,50	1,47
Rata-rata <i>error</i>					3,019	0,67

Pada Tabel G.2, divariasikan nilai tekanan injeksi uap, terhadap laju aliran massa dan kualitas uap yang konstan (2,208 kg/s ; 80%). Nilai variasi merupakan tambahan atau gain 10% terhadap nilai keadaan awal (600 psia).

Tabel G.2 Validasi model terhadap variasi tekanan uap injeksi

P (psia)	PIPESIM		Model Beggs and Brill		% error P	% error T
	P out (psia)	T out (F)	P out (psia)	T out (F)		
600	624,7638	490,6204	635,904	492,543	1,78	0,39
660	703,1686	503,641	732,022	508,153	4,10	0,89
720	777,479	514,9943	806,068	519,141	3,67	0,80
780	849,3489	525,2117	885,227	530,066	4,22	0,92
840	920,3516	534,6767	964,588	540,295	4,80	1,05
900	990,1185	543,4483	1043,141	549,804	5,35	1,16
960	1059,35	551,6974	1120,864	558,687	5,80	1,26
1020	1128,673	559,5541	1197,895	567,038	6,13	1,33
1080	1197,645	567,0124	1274,792	574,974	6,44	1,40
1140	1266,331	574,1191	1351,523	582,533	6,72	1,46
1200	1335,451	580,9777	1425,919	589,553	6,77	1,47
Rata-rata <i>error</i>					5,075	1,108

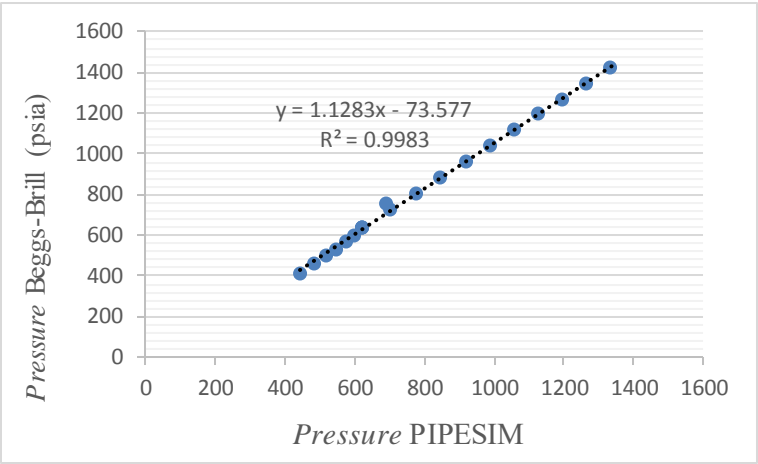
Pada Tabel G.3, divariasikan nilai kualitas uap, terhadap laju aliran massa dan tekanan uap yang konstan (2,208 kg/s ; 600 psia). Nilai variasi dilakukan pada kualitas 70% dan 90%.

Tabel G.3 Validasi model terhadap variasi kualitas uap injeksi

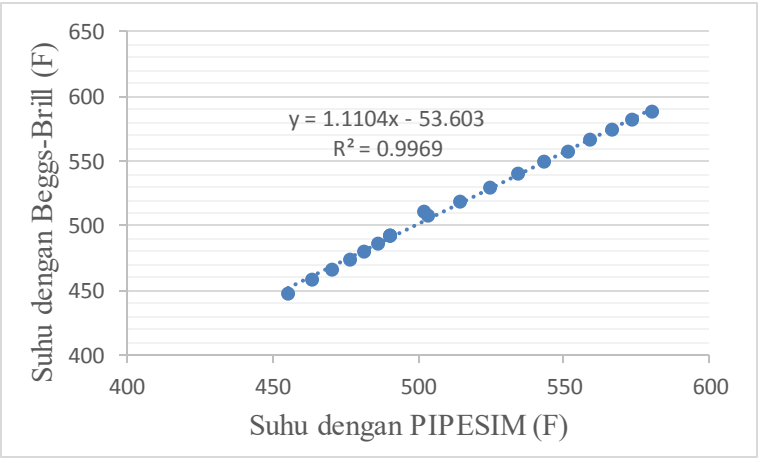
x (%)	PIPESIM		Model Beggs and Brill		% error P	% error T
	P out (psia)	T out (F)	P out (psia)	T out (F)		
70	693,2793	502,0619	755,021	511,654	8,905	1,910
90	624,7638	490,6204	635,904	492,543	1,783	0,392
Rata-rata <i>error</i>					5,344	1,151

Plot validasi gabungan dari tabel diatas dinyatakan pada Gambar G.1 untuk pemodelan tekanan. Sementara itu Gambar G.2

menyatakan plot validasi suhu hasil pemodelan dengan simulasi PIPESIM.



Gambar G.1 Plot validasi model tekanan pada *injection well* dengan *Software PIPESIM*



Gambar G.2 Plot validasi model suhu pada *injection well* dengan *Software PIPESIM*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN H Validasi Pemodelan Suhu dan Tekanan menggunakan Beggs-Brill pada *Production Well*

Validasi model *production well* dilakukan terhadap hasil pemodelan dengan software Schlumberger PIPESIM. Pada Tabel H.1, divariasikan nilai laju aliran massa injeksi uap, terhadap tekanan dan kualitas uap yang konstan (600 psia ; 80%). Nilai variasi merupakan tambahan atau gain 10% terhadap nilai keadaan awal (2,208 kg/s).

Tabel H.1 Validasi model terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m (kg/s)	PIPESIM		Model Begs Brill		Error P (%)	Error T (%)
	P out (psia)	T out (F)	P out (psia)	T out (F)		
2,208	338,7328	428,6553	337,833	428,404	0,26	0,05
2,428	307,3415	419,5888	316,348	422,260	2,93	0,63
2,649	267,3146	406,9228	279,686	410,986	4,62	0,99
2,870	216,5383	388,5314	225,702	392,082	4,23	0,91
3,091	147,1792	356,9444	138,484	352,195	5,90	1,33
Rata-rata <i>error</i>					3,59	0,78

Pada Tabel H.2, divariasikan nilai tekanan injeksi uap, terhadap laju aliran massa dan kualitas uap yang konstan (2,208 kg/s ; 80%). Nilai variasi merupakan tambahan atau gain 10% terhadap nilai keadaan awal (600 psia).

Tabel H.2 Validasi model terhadap variasi tekanan uap injeksi

P (psia)	PIPESIM		Model Begs Brill		Error P (%)	Error T (%)
	P out (psia)	T out (F)	P out (psia)	T out (F)		
600	338,7328	428,6553	337,833	428,404	0,26	0,05
660	409,1685	446,8515	430,509	451,884	5,21	1,12
720	474,3352	461,6474	460,216	458,580	2,97	0,66
780	536,1557	474,3031	508,863	468,861	5,09	1,14

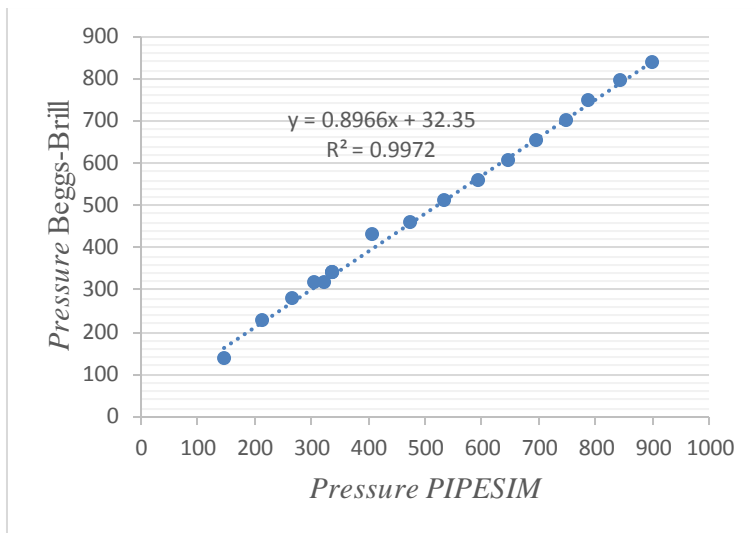
840	595,6487	485,4661	557,162	478,348	6,46	1,46
900	646,5982	494,3664	605,300	487,195	6,38	1,45
960	696,8406	502,6325	652,308	495,330	6,39	1,45
1020	748,911	510,7319	700,047	503,144	6,52	1,48
1080	789,4519	516,7451	746,647	510,388	5,42	1,23
1140	845,8997	524,7367	792,150	517,137	6,35	1,44
1200	900,3419	532,0674	836,139	523,384	7,13	1,63
Rata-rata <i>error</i>					5,29	1,19

Pada Tabel H.3, divariasikan nilai kualitas uap, terhadap laju aliran massa dan tekanan uap yang konstan (2,208 kg/s ; 600 psia). Nilai variasi dilakukan pada kualitas 70% dan 90%.

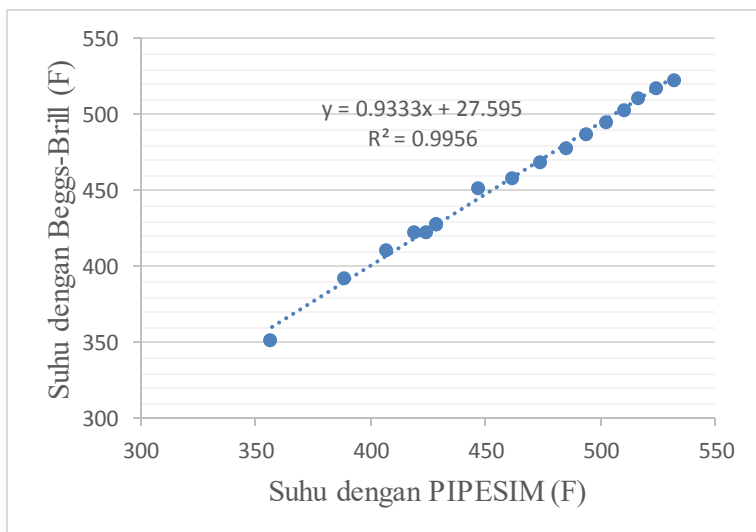
Tabel H.3 Validasi model terhadap variasi kualitas uap injeksi

x (%)	PIPESIM		Model Beggs Brill		Error P (%)	Error T (%)
	P out (psia)	T out (F)	P out (psia)	T out (F)		
70	322,6975	424,1092	317,279	422,533	1,67	0,37
90	338,7328	428,6553	337,833	428,404	0,26	0,05
Rata-rata <i>error</i>					0,97	0,21

Plot validasi gabungan dari tabel diatas dinyatakan pada Gambar H.1 untuk pemodelan tekanan. Sementara itu Gambar H.2 menyatakan plot validasi suhu hasil pemodelan dengan simulasi PIPESIM.



Gambar H.1 Plot validasi model tekanan pada *injection well* dengan Software PIPESIM



Gambar H.2 Plot validasi model suhu pada *injection well* dengan Software PIPESIM

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN I Validasi Pemodelan Tekanan pada Reservoir menggunakan Darcy

Validasi model tekanan pada reservoir dilakukan terhadap hasil simulasi dengan software COMSOL *Multiphysics*. Pada Tabel I.1, divariasikan nilai laju aliran massa injeksi uap, terhadap tekanan dan kualitas uap yang konstan (600 psia ; 80%). Nilai variasi merupakan tambahan atau gain 10% terhadap nilai keadaan awal (2,208 kg/s).

Tabel I.1 Validasi model terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m (kg/s)	<i>Dinamic Viscosity (Pa.s)</i>	q/a (m/s)	P inlet (psia)	P outlet (psia)	P simulasi (psia)	<i>error (%)</i>
2,20	8,76E-05	0,000117222	691,9	565,0	566,2	0,2158
2,42	8,30E-05	0,000128944	651,5	519,0	520,9	0,357
2,64	7,91E-05	0,000140667	619,5	481,5	483,6	0,4356
2,87	7,59E-05	0,000152389	592,2	448,6	451,3	0,6065
3,09	7,32E-05	0,000164111	560,2	411,0	413,9	0,7121
3,31	7,08E-05	0,000175833	528,7	373,8	376,7	0,7812
3,53	6,88E-05	0,000187555	494,9	334,1	337,1	0,9133
3,75	6,71E-05	0,000199278	457,2	290,1	294,4	1,4657
3,97	6,57E-05	0,000211	414,3	240,6	245,4	1,9984
Rata-rata <i>error</i>						0,831

Pada Tabel I.2 , divariasikan nilai tekanan injeksi uap, terhadap laju aliran massa dan kualitas uap yang konstan (2,208 kg/s ; 80%). Nilai variasi merupakan tambahan atau *gain* 10% terhadap nilai keadaan awal (600 psia).

Tabel I.2 Validasi model terhadap variasi tekanan uap injeksi

P steam (psia)	<i>Dinamic Viscosity (Pa.s)</i>	q/a (m/s)	P inlet (psia)	P outlet (psia)	P simulasi (psia)	<i>error (%)</i>
600	8,76E-05	0,000117222	691,9	565,0	567,2	0,39

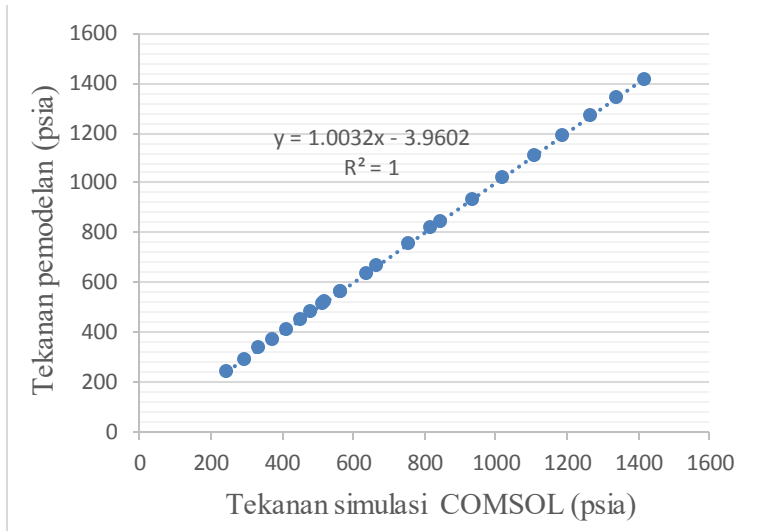
660	8,77E-05	0,000106256	778,4	663,2	664,0	0,12
720	8,79E-05	9,70544E-05	860,3	755,1	756,2	0,14
780	8,8E-05	8,92187E-05	943,0	846,1	846,8	0,08
840	8,84E-05	8,24619E-05	1024,9	935,2	934,8	0,04
900	8,87E-05	7,65725E-05	1106,2	1022,6	1022,9	0,02
960	8,72E-05	7,1391E-05	1184,2	1107,2	1107,9	0,05
1020	8,56E-05	6,67948E-05	1258,1	1187,5	1188,1	0,05
1080	8,41E-05	6,26882E-05	1330,0	1264,9	1265,9	0,07
1140	8,27E-05	5,89951E-05	1402,5	1342,3	1342,3	0,001
1200	8,13E-05	5,56546E-05	1472,4	1416,6	1416,6	0,0004
Rata-rata <i>error</i>						0,091

Pada Tabel I.3, divariasikan nilai kualitas uap, terhadap laju aliran massa dan tekanan uap yang konstan (2,208 kg/s ; 600 psia). Nilai variasi dilakukan pada kualitas 70% dan 90%.

Tabel I.3 Validasi model terhadap variasi kualitas uap injeksi

X (%)	<i>Dinamic Viscosity</i> (Pa.s)	q/a (m/s)	P inlet (psia)	P outlet (psia)	P simulasi (psia)	<i>error</i> (%)
50	9,42E-05	7,46914E-05	906,0	818,8	820,0	0,15
70	9,57E-05	0,000103045	759,0	637,2	638,5	0,21
90	7,92E-05	0,000131399	639,3	510,4	512,1	0,34
Rata-rata <i>error</i>						0,23

Plot validasi dengan menggunakan COMSOL dari tabel diatas dinyatakan pada Gambar I.1 untuk pemodelan tekanan.



Gambar I.1 Plot validasi model tekanan pada reservoir dengan *software* COMSOL

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN J Validasi Pemodelan Suhu pada Reservoir menggunakan Darcy

Validasi model suhu pada reservoir dilakukan terhadap hasil simulasi dengan software COMSOL *Multiphysics*. Pada Tabel J.1, divariasikan nilai laju aliran massa injeksi uap, terhadap tekanan dan kualitas uap yang konstan (600 psia ; 80%). Nilai variasi merupakan tambahan atau gain 10% terhadap nilai keadaan awal (2,208 kg/s).

Tabel J.1 Validasi model terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m <i>steam</i> inlet (kg/s)	P <i>steam</i> inlet (psia)	X <i>steam</i> inlet	T outlet model (K)	T outlet Simulasi (K)	error T (%)
2,208	600	80	522,93	519	0,75
2,428	600	80	516,23	516,14	0,01
2,870	600	80	515,54	517,08	0,29
3,091	600	80	513,00	515,9	0,56
3,312	600	80	509,96	513,83	0,75
3,533	600	80	506,32	511,45	1,00
3,753	600	80	501,87	507,12	1,03
3,974	600	80	496,28	504,32	1,59
Rata-rata <i>error</i>					0,751

Pada Tabel J.2 , divariasikan nilai tekanan injeksi uap, terhadap laju aliran massa dan kualitas uap yang konstan (2,208 kg/s ; 80%). Nilai variasi merupakan tambahan atau gain 10% terhadap nilai keadaan awal (600 psia).

Tabel J.2 Validasi model terhadap variasi tekanan uap injeksi

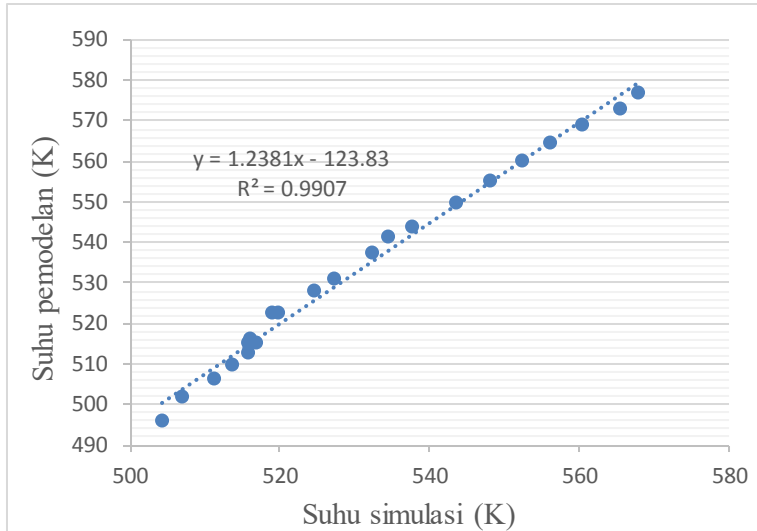
m <i>steam</i> inlet (kg/s)	P <i>steam</i> inlet (psia)	X <i>steam</i> inlet (%)	T outlet model (%)	T outlet Simulasi (K)	error T (%)
2,208	600	80	522,93	520	0,56

2,208	660	80	531,02	527,49	0,66
2,208	720	80	537,71	532,43	0,99
2,208	780	80	544,20	537,89	1,17
2,208	840	80	549,96	543,69	1,15
2,208	900	80	555,22	548,14	1,29
2,208	960	80	560,12	552,63	1,35
2,208	1020	80	564,70	556,23	1,52
2,208	1080	80	569,13	560,65	1,51
2,208	1140	80	573,31	565,53	1,37
2,208	1200	80	577,14	567,9	1,62
Rata-rata <i>error</i>					1,204

Tabel J.3 Validasi model terhadap variasi kualitas uap injeksi

m <i>steam</i> inlet (kg/s)	P <i>steam</i> inlet (psia)	X <i>steam</i> inlet (%)	T outlet model (%)	T outlet Simulasi (K)	<i>error</i> T (%)
2,208	600	50	541,64	534,5	1,34
2,208	600	70	528,25	524,72	0,67
2,208	600	90	515,26	515,92	0,13
Rata-rata <i>error</i>					0,712

Plot validasi dengan menggunakan COMSOL dari tabel diatas dinyatakan pada Gambar J.1 untuk pemodelan suhu.



Gambar J.1 Plot validasi model suhu pada reservoir dengan *software* COMSOL

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran K Source Code Genetic Algorithm

Berikut ini ada source code genetic algorithm untuk pada sheet Excel VBA.

Option Base 1

DefDb1 A-H, O-Z: DefInt I-N

Dim NFV, FMAX, m1

Private Sub CommandButton1_Click()

VBA.Reset

Dim X(), XMAX(), POP1\$(), POP2\$(), FC()

'X :vector containing the current individual

'XMAX :best individual among all generations

'POP1 :string array containing the old population

'POP2 :string array containing the current population

'FC :vector containing the objective value for each individual

'IREPEAT:maximum number of generations without substantial fitness improvement

'MFI :minimum fitness improvement required by the user

'fold :fitness value for the generation i-1

'ict :current number of generations without significant fitness improvement

'seed :random number seed

'N :Number of parameters to be optimized

'NB :number of bits to be used for encoding each parameter

'IZ :population size

'NGEN :number of generations

'CP :crossover probability

'BP :mutation probability


```

N = Cells(111, 5):
NB = Cells(112, 5):
IZ = Cells(109, 5):
NGEN = Cells(110, 5)
CP = Cells(110, 9):
BP = Cells(109, 9)
IREPEAT = Cells(116, 9):
MFI = Cells(115, 9)

Sheet5.Activate
ReDim X(N), XMAX(N), POP1$(IZ), POP2$(IZ),
FC(IZ)

'Create Initial Population
Call GETPOP(POP1$(), IZ, NB, N)
NFV = 0: igen = 0: ict = 0
Do
    igen = igen + 1
    Call EVAL(POP1$(), IZ, NB, N, FC(), X(),
NFV, FIT, FMAX, XMAX(), cons)

    'count the number of generations without
significant improvement in fitness
    If igen = 1 Then fold = FMAX
    If FMAX >= fold And Abs((FMAX - fold) /
(fold + 1)) < MFI Then
        ict = ict + 1
    Else
        ict = 0
    End If
    fold = FMAX

    'Stopping Criterium. Alternative criteria
can be implemented
    If (igen > NGEN) Or (ict >= IREPEAT) Then

```

```

        Cells(97, 2) = XMAX(1)
        Cells(97, 3) = XMAX(2)
        Cells(97, 4) = XMAX(3)
        FMAX = 0
        FIT = 0
    Exit Do
End If
Sheet5.Cells(igen + 1, 1) = igen
Sheet5.Cells(igen + 1, 2) = FIT
Sheet5.Cells(igen + 1, 3) = FMAX
Sheet5.Cells(igen + 1, 4) = NFV
Sheet5.Cells(igen + 1, 5) = XMAX(1)
Sheet5.Cells(igen + 1, 6) = XMAX(2)
Sheet5.Cells(igen + 1, 7) = XMAX(3)

'Genetic Operations
Call REPROD(POP1$(), POP2$(), FC(), IZ)
Call CROSOVR(POP1$(), POP2$(), CP, IZ, NB,
    N)
Call MUTATION(POP1$(), BP, IZ, NB, N)
Loop

'Print results
Sheet5.Activate

End Sub

Function Bin2Dec(sMyBin As String) As Long
    Dim X As Integer
    Dim iLen As Integer
    iLen = Len(sMyBin) - 1

    For X = 0 To iLen
        Bin2Dec = Bin2Dec + Mid(sMyBin, iLen - X + 1, 1)
        * 2 ^ X
    Next X

```

End Function

```
Private Sub CommandButton5_Click()  
'command button untuk force stop running GA dan  
menampilkan hasil terbaik sementara  
fit_max = 0
```

```
    For it = 2 To 200  
        fit_i = Sheet5.Cells(it, 3)
```

```
        If fit_max < fit_i Then  
            fit_max = fit_i  
            a = Sheet5.Cells(it, 5)  
            b = Sheet5.Cells(it, 6)  
            c = Sheet5.Cells(it, 7)
```

```
        End If  
    Next it
```

```
Cells(97, 2) = a  
Cells(97, 3) = b  
Cells(97, 4) = c
```

End Sub

```
Private Sub CommandButton6_Click()  
'commandbutton untuk menghapus sheet history
```

```
For q = 2 To 200  
Sheet5.Cells(q, 1) = ""  
Sheet5.Cells(q, 2) = ""  
Sheet5.Cells(q, 3) = ""  
Sheet5.Cells(q, 4) = ""  
Sheet5.Cells(q, 5) = ""  
Sheet5.Cells(q, 6) = ""  
Sheet5.Cells(q, 7) = ""
```

```
Next q  
End Sub
```

Berikut ini ada *source code genetic algorithm* untuk pada *module Excel VBA*.

```
Option Base 1
DefDb1 A-H, O-Z: DefInt I-N
Dim NFV, FMAX

Function Bin2Dec(sMyBin As String) As Long
Dim X As Integer
Dim iLen As Integer
    iLen = Len(sMyBin) - 1
For X = 0 To iLen
    Bin2Dec = Bin2Dec + Mid(sMyBin, iLen - X +
1, 1) * 2 ^ X
Next X
End Function

Public Sub SimpleGA()

Sub CROSOVR(POP1$(), POP2$(), CP, IZ, NB, N)
NBN = NB * N
For i = 1 To IZ / 2
    Randomize
    II = Int(Rnd(NBN - 1)) + 1
    I1 = 2 * i - 1: I2 = 2 * i
    If I2 > IZ Then I2 = 1
    If Rnd <= CP Then
        For k = 1 To II
            c1$ = Mid$(POP2$(I1), k, 1)
            c2$ = Mid$(POP2$(I2), k, 1)
            Mid$(POP2$(I1), k, 1) = c2$
            Mid$(POP2$(I2), k, 1) = c1$
```

```

        Next k
    End If
Next i
For i = 1 To IZ
    POP1$(i) = POP2$(i)
Next i
End Sub

```

```

Sub EVAL(POP1$(), IZ, NB, N, FC(), X(), NFV,
FIT, FMAX, XMAX(), cons)
FIT = 0
For i = 1 To IZ
    For j = 1 To N
        X(j) = Bin2Dec(Mid(POP1$(i), 1 + (j -
1) * NB, NB))
    Next j

```

```

Call GETFUN(X(), F, NFV, N, NB)
FIT = FIT + (F - FIT) / i
cons = Sheet2.Cells(117, 15)

```

```

'=====PASTIKAN SAMA DI SUB FUNCTION
GETFUN=====

```

```

Dim MinX1, MaxX1, MinX2, MaxX2, MinX3, MaxX3,
c1, c2, c3, a, b, c As Double
MinX1 = 2
MaxX1 = 7
MinX2 = 300
MaxX2 = 3190
MinX3 = 80
MaxX3 = 99.99

```

```

c1 = ((2 ^ NB) / (MaxX1 - MinX1))
c2 = ((2 ^ NB) / (MaxX2 - MinX2))
c3 = ((2 ^ NB) / (MaxX3 - MinX3))
a = ((X(1) / c1) + MinX1)
b = ((X(2) / c2) + MinX2)
c = ((X(3) / c3) + MinX3)
X(1) = a
X(2) = b
X(3) = c

```

```

'=====
=====
If cons = 1 Then
    If NFV = 1 Then
        FMAX = F
        For j = 1 To N:
            XMAX(j) = X(j):
        Next j
    Else
        If FMAX < F Then
            FMAX = F
            For j = 1 To N:
                XMAX(j) = X(j):
            Next j
        End If
    End If
    FC(i) = F

End If
Next i
End Sub

```

```

Sub GETPOP(POP1$(), IZ, NB, N)
Dim cs$
For i = 1 To IZ
  cs$ = ""
  For j = 1 To N
    For k = 1 To NB
      Randomize
      c = Rnd
      If c > 0.5 Then
        cs$ = cs$ + "1"
      Else
        cs$ = cs$ + "0"
      End If
    Next k
    POP1$(i) = cs$
  Next j
Next i
End Sub

```

```

Sub MUTATION(POP1$(), BP, IZ, NB, N)
Dim c$
For i = 1 To IZ
  KK = 0
  For j = 1 To N
    For k = 1 To NB
      KK = KK + 1
      Randomize
      If Rnd <= BP Then
        c = Mid(POP1$(i), KK, 1)
        If Rnd > 0.5 Then c$ = "1" Else c =
"0"

```

```

            Mid(POP1$(i), KK, 1) = c
        End If
    Next k
Next j
Next i
End Sub

```

```

Sub REPROD(POP1$(), POP2$(), FC(), IZ)
Dim cs$

```

```

FL = FC(1): fh = FC(1)
For i = 1 To IZ
    If FL > FC(i) Then FL = FC(i)
    If fh < FC(i) Then fh = FC(i)
Next i

```

```

Sum = 0
c = Abs(fh)
If c < 1 Then c = 1
For i = 1 To IZ
    FC(i) = (FC(i) - FL) / c
    Sum = Sum + FC(i)
Next i

```

```

If Sum = 0 Then
    For i = 1 To IZ: FC(i) = 1: Next i
Else

```

```

'----- Determination of String Count for Mating
FC()
ISUM = 0: PSUM = 0

```



```

For i = 1 To IZ
    PSUM = PSUM + FC(i)
    I1 = Int(IZ * PSUM / Sum + 0.001)
    FC(i) = I1 - ISUM
    ISUM = I1
Next i
End If

```

```

'----- Reproduction by Proportionate Selection
INEXT = 0
For i = 1 To IZ
    cs$ = POP1$(i)
    For k = 1 To FC(i)
        INEXT = INEXT + 1
        POP2$(INEXT) = cs$
    Next k
Next i
End Sub
Sub GETFUN(X(), F, NFV, N, NB)

```

```

'=====PASTIKAN SAMA DENGAN DI SUB
FUNCTION EVAL=====
Dim MinX1, MaxX1, MinX2, MaxX2, MinX3, MaxX3,
c1, c2, c3, a, b, c As Double
MinX1 = 2
MaxX1 = 7
MinX2 = 300
MaxX2 = 3190
MinX3 = 80
MaxX3 = 99.99
c1 = ((2 ^ NB) / (MaxX1 - MinX1))

```

```

c2 = ((2 ^ NB) / (MaxX2 - MinX2))
c3 = ((2 ^ NB) / (MaxX3 - MinX3))
a = ((X(1) / c1) + MinX1)
b = ((X(2) / c2) + MinX2)
c = ((X(3) / c3) + MinX3)
'=====
=====

```

```

Sheet2.Cells(97, 2) = a 'X(1) Flow massa
Sheet2.Cells(97, 3) = b 'X(2) Tekanan
Sheet2.Cells(97, 4) = c 'X(3) quality

```

```

    PauseTime = 0.03
    Start = Timer
        Do While Timer < Start + PauseTime
            DoEvents
        Loop

```

```

    F = Sheet2.Cells(104, 7) 'Obejective
function
    NFV = NFV + 1
End Sub

```

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Berikut ini adalah mekanisme *genetic algorithm*.

Parameter yang digunakan dalam *genetic algorithm* adalah Satu kromosom terdiri dari 20 bit. Nilai *crossover probability* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah 0,8; *population size* 100; *max. generation* 100; *mutation probability* 0,01; dan *elitism* sebesar 0,95.

- Inisiasi dan pengkodean kromosom

Kromosom (genotip) digenerasikan dari fungsi *random* (rnd) sebanyak 20 bit untuk masing-masing variabel yang akan dioptimasi. Sebagai contoh digunakan 5 bit dengan 3 variabel. Jumlah genotip yang digenerasikan akan sebanyak *population size*, yaitu 100. Sebagai contoh tahap inisiasi ada pada Tabel K.1.

Tabel K.1 Inisiasi dan pengkodean kromosom

Individu ke-	Genotip
n	[var 1] [var 2] [var 3]
1	10110 01011 11101
2	11100 01100 00010
3	10011 10011 00110
....	
100	00101 11011 10101

- Evaluasi

Dalam tahap evaluasi nilai genotip akan dirubah ke nilai fenotip. Pengubahan nilai disesuaikan dengan *range* dari variable yang akan dioptimasi (fenotip). Misal variable 1 memiliki range 2-7, variable 2 memiliki range 200-3200, variable 3 memiliki range 80-100.

Dalam mengevaluasi kemampuan solusi dari suatu individu, algoritma dihubungkan dengan model matematis. Sedangkan nilai dari *objective function* akan menjadi nilai *fitness*.

Misal pengkodean 5 bit, maka *range* pengkodean adalah 0 hingga $1x2^4 + 1x2^3 + 1x2^2 + 1x2^1 + 1x2^0$ atau 0 hingga 31. Misal suatu variabel memiliki kromosom 11110 dengan *range* 200-3200. Maka perhitungan fenotip nya:

$$fenotip = 200 + \frac{1x2^4 + 1x2^3 + 1x2^2 + 1x2^1 + 0x2^0}{31} \times (3200 - 200)$$

$$fenotip = 200 + \frac{30}{31} \times (3200 - 200)$$

$$fenotip = 3103,2$$

Nilai fenotip dari masing-masing variabel dalam satu individu kemudian disubstitusikan ke dalam model untuk mendapatkan nilai *fitness*, seperti pada Tabel K.2

Tabel K.2 Tahap evaluasi

Individu ke	Range 5 bit	Fenotip var 1	Fenotip var 2	Fenotip var 3	<i>Fitness</i>
1	0-31	5.55	1264.52	98.71	3576
2		6.52	1361.29	81.29	2977
3		5.06	2038.71	83.87	3794
...					
100		2.81	2812.90	93.55	2799

- Seleksi

Misal pada fungsi tujuan untuk memaksimalkan *objective function*, maka Tabel K.2 akan diurutkan berdasarkan nilai *fitness* terbesar. Individu dengan nilai *fitness* terbesar akan memiliki peluang lebih besar untuk lanjut ke tahap rekombinasi.

Tabel K.2 Tahap seleksi

Individu ke	range 5 bit	fenotip var 1	fenotip var 2	fenotip var 3	fitness
3	0-31	5.06	2038.71	83.87	3794
1		5.55	1264.52	98.71	3576
2		6.52	1361.29	81.29	2977
...					
100		2.81	2812.90	93.55	2799

- Rekombinasi

Pada tahap rekombinasi, kromosom dari individu dengan nilai terbaik akan dikawin silangkan. Operator rekombinasi adalah melalui genotip atau bilangan biner. Misal Individu ke 3, direkombinasi dengan indovidu ke 1. Garis merah menunjukkan titik rekombinasi atau *crossover point*.

Tabel K.3 Tahap rekombinasi

Individu ke-	Genotip
1 (parent)	10110 01 011 11101
3 (parent)	10011 10 011 00110
1 (child)	10110 01011 00110
3 (child)	10011 10011 11101

- Mutasi

Tahap ini bertujuan untuk memberikan variasi tambahan pada solusi yang telah ada. Cara dari mekanisme mutasi ini adalah dengan memberikan nilai *reverse* atau kebalikan dari deretan kromosom dari suatu individu.

Tabel K.3 Tahap rekombinasi

Individu ke-	Genotip
1 (child)	10110 01011 00110
1 (with mutation)	10110 00011 00110

- Penggantian

Pada tahap penggantian, populasi lama akan digantikan dengan populasi yang baru. Populasi baru diambil dari hasil proses rekombinasi dan mutasi. Mekanisme penggantian yang digunakan adalah *elitism*.

Tabel K.1 Penggantian populasi lama dengan populasi yang baru.

Individu ke-	Genotip
1	10110 01011 00110
2	11100 01100 00010
3	10011 10011 11101
....	
100	01101 10011 10111

Seluruh mekanisme ini akan berulang terus menerus hingga mencapai *stopping criteria*. *Stoping criteria* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *minimum fitness improvement* (MFI) < 0.05% dan *maximum number of generation* 100. Apabila dalam beberapa generasi tidak menunjukkan peningkatan nilai fitness (MFI) maka algoritma akan dihentikan. Begitu juga ketika jumlah generasi yang dibangkitkan sudah mencapai 100 generasi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari hasil tugas akhir mengenai optimasi *produksi crude oil*, energi, dan air limbah pada *steam flood* EOR menggunakan *genetic algorithm* adalah:

- *Steam flood operation* EOR dapat dimodelkan dengan baik dengan membagi menjadi tiga bagian: *injection-production well* (metode Beggs-Brill); dan reservoir (persamaan Darcy)
- Pemodelan suhu dan gradien tekanan pada *injection well* dan *production well* dengan metode Beggs-Brill menunjukkan rata-rata *error* 2,369 % dibandingkan dengan simulasi *software* PIPESIM.
- Pemodelan suhu dan gradien tekanan pada *reservoir* dengan persamaan Darcy, menunjukkan rata-rata *error* 0,39 % dibandingkan dengan simulasi COMSOL.
- Berdasarkan analisis sensitifitas karakteristik model, profit *steam flood* akan meningkat secara eksponensial terhadap peningkatan laju aliran massa injeksi. Profit akan menurun secara logaritmik dan polinomial terhadap peningkatan tekanan injeksi dan kualitas uap injeksi.
- *Genetic algorithm* dapat mengoptimalkan kondisi operasi *steam flood* hingga 219,6%. Pada studi kasus Hamaca Field, profit dapat dioptimasi dari 7904,89 USD/hari menjadi 17360,34 USD/hari.
- *Steam flood operation* dengan *sucker rod pump* yang dioptimasi dengan *genetic algorithm* mampu menurunkan kebutuhan laju aliran injeksi (3,66%), menurunkan biaya water treatment (7,8%), menurunkan tekanan injeksi (34%), dan meningkatkan net profit sebesar 18,69%.

5.2. Saran

Hal yang dapat penulis sarankan dalam penelitian selanjutnya adalah:

- Mengembangkan pemodelan *sweep efficiency* untuk derajat API dari berbagai karakteristik reservoir agar nilainya lebih akurat.
- Melakukan penelitian dengan jenis EOR yang lain untuk mengetahui EOR yang paling efektif dan optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Allawzi, M. A. (2008). Study of the Effect of Steam Injection on Crude Oil Displacement Yield from an Oil Contaminated Soil Bed. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2, 208-217.
- Beggs, H. D. (1973). A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. *SPE-AIME*, 616-617.
- Bera, A. (2015). Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review. *Applied Energy*(151), 206-226.
- Ce'sar, e. a. (2013). Multi-objective optimization of steam power plants for sustainable. *Clean Techn Environ Policy*, 551-566.
- Dutt, A. (2012). Modified analytical model for prediction of steam flood performance. *PRODUCTION ENGINEERING*, 2, 117-123.
- Fakhru'l-Razi, A. e. (2009). Review of technologies for oil and gas produced. *Hazard. Mater*, 170 (2-3), 530-551.
- Ginting, H. J. (2015). Optimasi Kondisi Operasi Steam Injection pada Proses Enhanced Oil Recovery menggunakan Genetic Algorithm. Surabaya.
- Graham, E. J. (2015). Probabilistic cost estimation methods for treatment of water extracted during CO₂ storage and EOR. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 316-327.
- Gu, H. (2015). Steam injection for heavy oil recovery: Modelling of wellbore heat efficiency and analysis of steam injection performance. *Energy Conversion and Management*, 97, 166-177.
- Gustavsson, A. J. (2010). Energy efficiency measures and conversion of fossil fuel. *Energy Efficiency*, 223-236.
- Miller, L. Z. (1992). New Functional Correlation for Saturated Steam Properties. *Society of Petroleum Engineer*.
- Putri, E. K. (2015). Pemodelan Pressure pada Sumur Injeksi Uap dengan Metode Beggs-Brill dan PIPESIM Software. Surabaya.

- Richard, K. (2004). Rivers: Form and Process in Alluvial CHannels. *Blackburn Press*.
- Smith. (2012, January). *Australia CO2 Conference*. Retrieved from Enhanced Oil Recovery: <http://www.co2conference.com/>
- Takacs, G. (2004). WAYS TO DECREASE PRODUCTION COSTS. Petroleum Engineering Department, University of Miskolc: Hungary.
- Xu, J. (2015). Study on relative permeability characteristics affected by displacement pressure gradient: Experimental study and numerical simulation. *Fuel* , 314-323.

BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis adalah Sony Andriyanto. Penulis dilahirkan di Kota Bojonegoro 27 Januari 1994. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Dalam riwayat pendidikannya, penulis telah menamatkan pendidikan formal dari SDK Yos Sudarso Blitar, SMPN 1 Blitar, SMAN 1 Blitar dan menempuh perkuliahan di jurusan Teknik Fisika ITS Surabaya. Saat masa studi, penulis aktif di Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas, dan sebagai koordinator asisten laboratorium rekayasa

Instrumentasi dan Kontrol. Dalam tugas akhirnya, penulis mengambil bidang minat instrumentasi dengan tema optimasi produksi *crude oil* pada *steam flood* EOR menggunakan *genetic algorithm*.

Penulis memiliki hobi membaca, menonton film, berenang, dan bermain alat music gitar. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail **sonyandriyanto@gmail.com**.